

**CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE PRESIÓN, PAR Y POTENCIA DE UN
MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILÍNDRICO BAJO DIFERENTES
REGÍMENTES DE OPERACIÓN**

DANIELA MARÍN ARIAS

MIGUEL TORO LADINO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2018

**CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE PRESIÓN, PAR Y POTENCIA DE UN
MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILÍNDRICO BAJO DIFERENTES
REGÍMENTES DE OPERACIÓN**

DANIELA MARÍN ARIAS

MIGUEL TORO LADINO

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

DIRECTORA

ING. DANIELA TORRES MORIMITSU

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2018

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.2 OBJETIVO GENERAL	10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 DEFINICIÓN	11
2.2 HISTORIA DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	11
2.3 TIPOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	13
2.3.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO	13
2.3.2 MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO	15
2.3.3 MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN	17
2.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	17
2.4.1 DIAGRAMA INDICADO	18
2.4.2 PRESIÓN	19
2.4.3 PAR	21
2.4.4 POTENCIA	22
2.4.5 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE.....	23
2.5 ÁNGULO DE AVANCE	24
2.6 TRATAMIENTO DE DATOS	25
2.7 PRE-PROCESAMIENTO DE SEÑALES	26
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	28
3.1 TÉRMINOS IMPORTANTES	29
3.2 CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS A UTILIZAR	29

4.1 MOTOR	32
4.2 ACONDICIONAMIENTO DEL MOTOR.....	34
4.3 SENSORES.....	41
4.3.1 SENSOR DE VELOCIDAD	41
4.3.2 SENSOR DE PRESIÓN.....	43
4.4 TARJETAS DE ADQUISICIÓN.....	44
4.5 EJECUCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	46
CAPÍTULO 5. FASE EXPERIMENTAL.....	49
5.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	49
5.1.1 METODOLOGÍA	49
5.1.2 ADQUISICIÓN DE DATOS	51
5.1.3 PROCESAMIENTO DE DATOS.....	51
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	53
CAPÍTULO 7: CONSIDERACIONES FINALES	67
7.1 CONCLUSIONES	67
7.2 RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes principales de un MCIA.	14
Figura 2. Esquema del funcionamiento del motor de cuatro tiempos.	15
Figura 3. Motor de encendido provocado.	16
Figura 4. Diagrama p-v	16
Figura 5. Motor de encendido por compresión	17
Figura 6. Diagrama indicado.	19
Figura 7. Curva de presión – ángulo del cigüeñal	20
Figura 8. Curva de par – régimen de giro	22
Figura 9. Curva de potencia – régimen de giro	23
Figura 10. Curvas de par y potencia – régimen de giro	23
Figura 11. Diagrama de consumo específico de combustible	24
Figura 12. Ángulo de avance de un MCI	25
Figura 13. Señal normalizada.	27
Figura 14. Detección del PMS.	27
Figura 15. Marcadores de ciclo.	28
Figura 16. Montaje experimental del MCI para toma de datos.	32
Figura 17. Motor Changfa	33
Figura 18. Motor CHANGFA sin sistema de arranque.	34
Figura 19. Montaje del sistema con distribuidor y detalle.	35
Figura 20. Encendido desmalezadora Goldstar.	35
Figura 21. Platina base y montaje.	36
Figura 22. Diagrama de conexión.	36
Figura 23. Dinamómetro CFK – 200	37
Figura 24. Dimensiones principales del sistema de carga.	37
Figura 25. Diagrama de cuerpo libre del motor y el dinamómetro.	38
Figura 26. Polea instalada.	39
Figura 27. Sensor de posición efecto Hall instalado en el motor del banco de pruebas.	39
Figura 28. Tacómetro digital multifunción.	40
Figura 29. Motor con relación de compresión de 9:1.	41
Figura 30. Motor con relación de compresión de 11:1.	41

Figura 31. Sensor de velocidad .	42
Figura 32. Sensor de presión .	43
Figura 33. Medidor de flujo.	44
Figura 34. Tarjetas de adquisición.	46
Figura 35. Señales de presión y velocidad	52
Figura 36. Señales de presión y velocidad normalizadas.	52
Figura 37. Señal segmentada.	53
Figura 38. Curvas características a carga baja	54
Figura 39. Curvas características a carga alta	55
Figura 40. Curvas características a carga baja	56
Figura 41. Curvas características a carga alta	57
Figura 42. Comparación de par a carga baja	58
Figura 43. Comparación de par a carga alta	59
Figura 44. Comparación de potencia a carga baja	60
Figura 45. Comparación de potencia a carga alta	61
Figura 46. Comparación de consumo específico de combustible a carga baja	62
Figura 47. Comparación de consumo específico de combustible a carga alta	63
Figura 48. Superposición de ciclos.	64
Figura 49. Media muestral de presión.	65
Figura 50. Error de presión.	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Combinación de pruebas a realizar	31
Tabla 2. Características generales del motor evaluado	33
Tabla 3. Características del dinamómetro.	37
Tabla 4. Datos generales sensor de posición angular.....	39
Tabla 5. Datos generales del tacómetro	40
Tabla 6. Ficha técnica de la tarjeta de adquisición NI 9232	45
Tabla 7. Ficha técnica de la tarjeta de adquisición NI 9234	45
Tabla 8. Resultados de presión RC 9.	46
Tabla 9. Resultados de presión RC 11.	47
Tabla 10. Resultados diseño de experimentos RC 9.	47
Tabla 11. Resultados diseño de experimentos RC 11	48
Tabla 12. Datos de régimen de giro a trabajar para carga baja	50
Tabla 13. Datos de régimen de giro a trabajar para carga alta	50
Tabla 14. Combustibles utilizados con sus relaciones de compresión.....	51

RESUMEN

Debido a que es importante conocer el comportamiento de ciertos parámetros de los motores de combustión interna de encendido provocado, funcionando bajo diferentes regímenes de operación, se hace necesario encontrar métodos para construir curvas representativas que caractericen dicho comportamiento. La presente investigación tiene como objetivo caracterizar las curvas de presión, potencia, par y consumo de un motor monocilíndrico funcionando con gasolina extra y corriente bajo diferentes condiciones de velocidad y carga. Dicho objetivo se logra mediante el análisis de señales experimentales con base en técnicas estadísticas y de tratamiento de datos. Inicialmente, se revisan conceptos teóricos generales sobre los motores de combustión interna y sus curvas más representativas, así como conceptos relacionados con el preprocesamiento y procesamiento de señales digitales y técnicas estadísticas para la recopilación, organización, análisis y presentación de datos. Se estudian las diferentes técnicas de diseño de experimentos y se selecciona la más adecuada para la realización del proyecto de investigación. Se instrumenta el motor y se adquieren las señales necesarias para el análisis requerido. Por medio de técnicas tales como, normalización, segmentación y tratamiento de señales, se procesan los datos y finalmente, mediante su análisis se procede a la construcción de las curvas de presión, potencia, par y consumo con base en procesos estadísticos y matemáticos.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde el laboratorio de máquinas de combustión interna de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, ha surgido la necesidad de estudiar el funcionamiento de los motores de combustión interna, ya que se desconoce el comportamiento de ciertos parámetros de los mismos al variar la velocidad y la carga, por esta razón se hace necesario encontrar la forma de construir algunas curvas representativas para este tipo de motor a partir de la realización de experimentos, análisis de señales y aplicación de técnicas estadísticas, ya que estas curvas caracterizan el funcionamiento de estos motores.

Algunas curvas representativas son: potencia y par en función del régimen de giro, presión en función del ángulo de giro del cigüeñal, entre otras. La curva de par en función del régimen de giro indica como varía la fuerza de empuje sobre el pistón. La curva de potencia en función del régimen de giro representa con cuanta velocidad se puede disponer del par, ya que, por definición, la potencia es el producto de la fuerza por la velocidad. La presión es el dato más relevante en el interior de los cilindros, a partir de los parámetros que se derivan de esta, es posible conocer con más detalle cómo ocurre el proceso de combustión al interior del motor y relacionarlo con el ángulo de giro del cigüeñal.

Debido a que estas curvas permiten conocer en detalle el comportamiento del motor, se hace necesario desarrollar métodos para construirlas, principalmente porque en la actualidad la forma más común de realizarlo es mediante el uso de un banco dinamométrico, el cual, no es sencillo de conseguir por su alto costo, por esta razón, quien desee realizar investigaciones profundas en este campo estará limitado. Además, tanto los investigadores como los usuarios de vehículos en general, en algunos casos solo tienen acceso a la información proporcionada por el manual de un vehículo, la cual puede ser insuficiente.

Con base en lo expuesto, desde la presente propuesta de investigación surge la siguiente pregunta: ¿Es posible caracterizar las curvas de presión, potencia y par de combustible de un motor de encendido por compresión, funcionando bajo diferentes regímenes de operación, mediante análisis, procesamiento de señales y técnicas estadísticas?

1.2 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar las curvas de presión, par, potencia y consumo de combustible de un motor de combustión interna monocilíndrico para dos puntos de carga y diferentes velocidades, mediante señales definidas a partir de un diseño de experimento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar los conceptos teóricos generales sobre los motores de combustión interna y sus curvas de presión, potencia, consumo de combustible y par; preprocesamiento y procesamiento de señales digitales y técnicas estadísticas para análisis de datos.
- Planificar el montaje experimental para la generación de la base de datos, con base en técnicas de diseño de experimentos.
- Instrumentar el motor de combustión interna y adquirir las señales necesarias de acuerdo con la planificación del experimento.
- Analizar los datos adquiridos por medio de técnicas de pre-procesamiento y procesamiento de señales experimentales.
- Construir y analizar las curvas de presión, potencia y par del motor evaluado mediante técnicas estadísticas y modelos matemáticos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de los motores de combustión interna: su historia, su funcionamiento y los diferentes tipos de motores existentes, haciendo énfasis en el motor de combustión interna alternativo, que es el estudiado en el presente proyecto, además se estudian las curvas de funcionamiento de los motores (presión, potencia, par y consumo de combustible), los tipos de encendido, etc.

También se presentan los conceptos básicos sobre señales, técnicas de pre-procesamiento y procesamiento, las cuales servirán de base para la caracterización de las curvas de funcionamiento del motor evaluado.

2.1 DEFINICIÓN

El motor de combustión interna es un conjunto de mecanismos y sistemas encargado de generar potencia mediante la transformación de energía. Inicialmente, la energía química contenida en un combustible se transforma en calor, el cual posteriormente, se convierte en movimiento (trabajo mecánico) a través de la expansión de los gases producto de la explosión del combustible en un cilindro-émbolo [1].

2.2 HISTORIA DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Se conocen muchos inventos que fueron antecesores de la creación del motor de combustión interna y que dieron a los científicos las bases para profundizar en el estudio de la termodinámica y finalmente realizar las primeras creaciones de máquinas que empleaban el uso de algún combustible para producir energía mecánica, algunos de estos inventos fueron, el molino de viento, la máquina de vapor, la máquina térmica de Herón, el regulador de Watt, entre otros [2].

A mediados del siglo XIX la máquina de vapor funcionaba bien, pero tenía el problema de su gran volumen para la aplicación en vehículos. La máquina de combustión interna, en la cual el combustible inyectado, mezclado con aire, se hace estallar o explotar para mover un pistón dentro de un cilindro, resultó ser la solución más adecuada.

La máquina de combustión interna más antigua registrada se da en el año 1800, cuando Philippe Lebon propuso e ideó un motor donde se inyectaba una mezcla de aire y gas de alumbrado dentro de un cilindro, con el objetivo de mover un pistón. Aunque Lebon no llevó su idea a la práctica.

En 1852, el francés de origen belga, Etienne Lenoir, construyó una máquina con un motor de explosión de dos tiempos capaz de moverse por sí sola, la cual consiguió con éxito un viaje de diez millas entre París y Joinville-le-Port a una velocidad de $3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Se conoce que hacia el año 1875 el ingeniero alemán Nikolaus August Otto fue quién construyó el primer motor de combustión interna de cuatro tiempos, este motor admitía en una carrera la carga de aire y gas de carbón, luego, en otra carrera la comprimía y después de una explosión se producía la carrera de expansión. Sin embargo, en sus inicios fabricó motores eficientes fijos de gas y enunció con claridad los principios de funcionamiento y fue en 1861 donde construyó un motor de combustión interna que consumía gas de alumbrado.

En 1875 perfeccionó el motor que construyó por primera vez en 1861 mediante los conocimientos estudiados sobre el ciclo de cuatro tiempos por Alphonse Beau de Rochas. Entre los colaboradores de Otto estaba Gottlieb Daimler, quien fue el que sustituyó el motor construido por Otto, por un motor alimentado con gasolina.

En 1883, Daimler, junto con Maybach, empezaron a ensayar los primeros motores alimentados con gasolina. Su construcción fue tan compacta que se utilizaron para vehículos ligeros, alcanzando velocidades de 900 rpm. En 1889, Daimler, construyó el motor definitivo para automóvil, sin embargo, al mismo tiempo otro alemán, el mecánico Karl Benz, trabajaba en el mismo sentido y en 1885 patentó un automóvil con un motor de cuatro tiempos y estructura de tubos, lo cual representaba un peso más conveniente con relación a la capacidad del motor.

El motor de gasolina de Daimler era el más eficaz y dominaba toda la industria automovilística, pero otro ingeniero trabaja con el fin de superar el motor ideado por Otto. El ingeniero francés, Rudolf Diesel patentó en 1892 lo que iba a ser la máquina más eficiente, el motor Diesel. Después de haberlo intentado en múltiples ocasiones, solo hasta 1897 construyó un motor Diesel, con una potencia de 25 CV y un rendimiento del 10%. Al año siguiente mejoró el motor, alcanzando un rendimiento del 18%, donde superó la eficacia del motor de Otto, fue desde entonces cuando se implementó el motor Diesel en la industria [3][2].

Los motores actuales emplean mayoritariamente combustibles derivados del petróleo, sin embargo, debido a problemas que se prevén y que se vienen presentando principalmente por dos factores que son: la alta emisión de gases contaminantes responsables de producir en la tierra el efecto

invernadero y que los combustibles fósiles tienden a desaparecer con el agotamiento del petróleo, se han desarrollado motores que emplean fuentes alternativas de energía como gas natural, biocarburantes, hidrógeno, motores eléctricos, entre otros.

Las medidas de control ambiental en el planeta han obligado a la industria productora de motores a desarrollar combustibles amigables con el medio ambiente, o al menos a implementar medidas que ayuden a reducir las emisiones en los vehículos, unas de las medidas que se han generado en este proceso han sido, la eliminación del plomo en la gasolina, desarrollo de los catalizadores, funcionamiento con mezclas pobres, entre otros [4].

A pesar de que el desarrollo de los motores se encuentra actualmente encaminado a la utilización de combustibles que preferiblemente no sean derivados del petróleo, debido a que este es un recurso limitado y a la importancia de la protección de los recursos naturales, como se menciona en el párrafo anterior, cabe mencionar que la técnica implementada en el desarrollo del experimento puede ser empleada para un motor que funcione con cualquier otro tipo de combustible, porque el funcionamiento de estos continúa siendo el mismo. A demás de que algunas de las empresas más importantes en el mundo en cuanto al desarrollo de vehículos automotores han expresado que se encuentran desarrollando nuevas tecnologías que permitirán continuar reduciendo la emisión de gases contaminantes, lo que indica que aún se podrán seguir realizando estudios con base a este tipo de motores por un largo tiempo [5].

2.3 TIPOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Hay diferentes tipos de motores de combustión interna, siendo los más conocidos los motores alternativos, la turbina de gas y los motores de rotación.

2.3.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO

Los motores de combustión interna alternativos son motores térmicos de desplazamiento positivo, en los que el trabajo se obtiene mediante el desplazamiento lineal del émbolo de un mecanismo biela-manivela. La Figura 1 representa el esquema básico de un motor de combustión interna alternativo. [6]

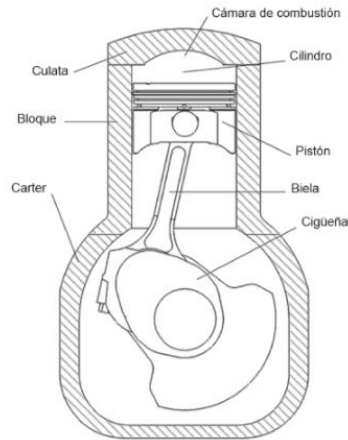


Figura 1. Componentes principales de un MCIA. [6].

El motor, durante su funcionamiento, realiza una serie de procesos que se repiten periódicamente y constituyen un ciclo termodinámico abierto. Las etapas básicas que tienen lugar en un motor de combustión interna son:

- Admisión: proceso en el que se presenta la entrada del fluido de trabajo.
- Compresión: proceso fundamental para incrementar el rendimiento termodinámico del motor, en el que el fluido de trabajo es comprimido dentro del cilindro.
- Combustión: proceso donde tienen lugar las reacciones químicas mediante las cuales se genera el estado térmico del fluido de trabajo.
- Expansión: proceso responsable de la producción de trabajo mecánico.
- Escape: etapa en la que se desalojan los gases producto de la combustión.

Los motores de combustión alternativos a su vez se clasifican según su proceso de combustión y según el modo de realizar el ciclo.

Según el proceso de combustión están el motor de encendido provocado y motor de encendido por compresión. El motor de encendido provocado es aquel motor en el que al final del proceso de compresión se dispone de una mezcla de aire-combustible homogénea. El combustible y el aire se mezclan en el conducto de admisión y a través de la válvula de admisión entran en el cilindro, donde se mezclan con una pequeña parte de los gases residuales del ciclo anterior y juntos son comprimidos por el pistón. El motor de compresión es un motor térmico que tiene combustión

interna alternativa que se produce por la auto-ignición del combustible debido a altas temperaturas derivadas de la alta relación de compresión que posee. [6]

Según el modo de realizar el ciclo existen motores de dos o cuatro tiempos. El motor de dos tiempos produce una explosión por cada vuelta de cigüeñal, este perdió popularidad con el transcurrir de los años por razones como el exagerado consumo de combustible al incrementar la potencia, las pérdidas de mezcla fresca en el escape y las emisiones altamente contaminantes de hidrocarburos inquemados y monóxido de carbono. El motor de cuatro tiempos requiere de cuatro carreras del pistón (o dos revoluciones del cigüeñal) para realizar el ciclo completo. Los procesos que se realiza en cada uno de los tiempos o carreras son como se mencionan anteriormente [7].

En las cercanías del punto muerto superior se produce la ignición de la mezcla (bien sea por un agente externo o por la autoinflamación de la mezcla), empezando el proceso de combustión. En la Figura 2 se observan las cuatro carreras del motor.

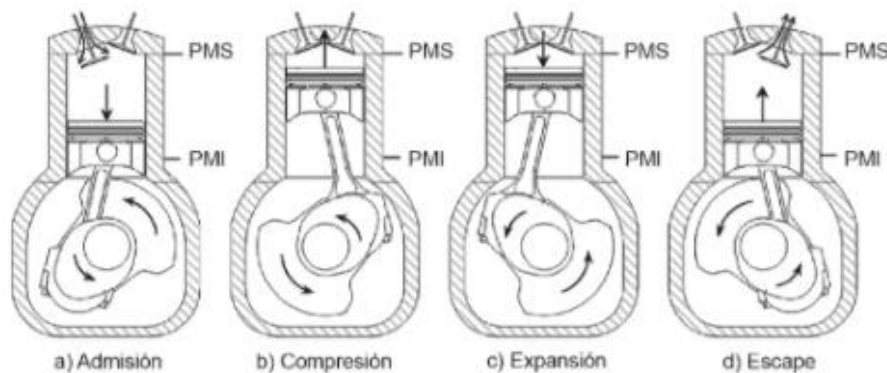


Figura 2. Esquema del funcionamiento del motor de cuatro tiempos. [6].

Los motores alternativos se pueden clasificar según la forma de provocar la ignición, siendo estos motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión.

2.3.2 MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO

Un motor de encendido provocado es un tipo de motor de combustión interna que utiliza la explosión de un combustible, provocada mediante una chispa, para expandir un gas empujando un pistón. El cuerpo de un motor de gasolina se compone de tres secciones principales:

- Culata

- Bloque
- Cárter



Figura 3. Motor de encendido provocado. [8].

Los motores de encendido provocado transforman la energía química en mecánica según el ciclo de Otto. En la Figura 4 se muestra en el diagrama $p-v$ los cuatro procesos básicos que forman el ciclo. En el proceso de 1 a 2 la mezcla de aire y combustible se comprime adiabáticamente; en el proceso de 2 a 3 ocurre el proceso de combustión con suministro de calor a volumen constante; en el proceso de 3 a 4 ocurre la expansión adiabática reversible de los productos de la combustión y, por último, el proceso de 4 a 1 es la entrega de calor al ambiente a volumen constante. [9]

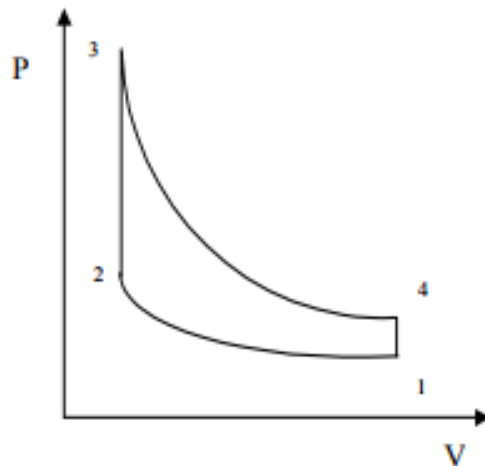


Figura 4. Diagrama $p-v$ [10].

2.3.3 MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

El motor de encendido por compresión es un motor de combustión térmica en el cual el encendido se da por la temperatura elevada debida a la compresión del aire en el interior del cilindro. El motor de encendido por compresión funciona mediante ignición de la mezcla aire-gas sin chispa. La temperatura en la que inicia la combustión procede de la elevación de presión producida en la etapa de compresión. El combustible se inyecta en la parte superior de la cámara de compresión a una presión elevada y se mezcla con aire a alta temperatura y presión, dando como resultado, la quema rápida de la mezcla.

La principal ventaja del motor de encendido por compresión con respecto al motor de encendido provocado es que consume menos combustible, el cual es, además, más barato.



Figura 5. Motor de encendido por compresión [11].

2.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Es posible conocer el comportamiento de ciertos parámetros relevantes en un motor de combustión interna de manera gráfica, estas representaciones son conocidas como curvas características, todas las gráficas que se realizan en este experimento son específicamente de los motores de 4 tiempos y sirven para:

- Mostrar el intervalo de uso de sus variables de operación, principalmente carga y régimen de giro.
- Describir la variación de los parámetros de los MCIA en función de las condiciones de

operación.

- Evaluar la idoneidad de un motor para una determinada aplicación.
- Comparar distintos motores entre sí.

Con carácter general se utilizan los siguientes tipos de curvas características:

- **Curvas características de velocidad.** Presentan los parámetros del motor en función del régimen de giro y para un grado de carga constante.
- **Curvas características de carga.** Presentan los parámetros del motor en función de la carga para un régimen de giro determinado.
- **Curvas características multiparamétricas.** Presentan la variación de los parámetros de salida del motor en función de más de una variable de operación.
- **Curvas características de regulación (calibración).** Su estructura y naturaleza es muy dependiente de la aplicación, así como del parámetro de regulación empleado [9]

Las curvas características más representativas son: el diagrama de presión contra volumen o diagrama indicado, el par, la potencia y el consumo de combustible en función del régimen de giro del cigüeñal y presión en función del ángulo de giro del cigüeñal [12].

2.4.1 DIAGRAMA INDICADO

El diagrama indicado (Figura 6) muestra de forma gráfica el comportamiento de ciertos parámetros del motor a medida que cambia la velocidad de rotación.

Uno de los parámetros que se puede obtener al analizar un diagrama indicado es la presión media indicada (PMI), que a su vez sirve para calcular el valor de la potencia indicada, es decir, la potencia desarrollada en los cilindros si se conocen los valores de la cilindrada total del motor y el número de carreras útiles por unidad de tiempo [13].

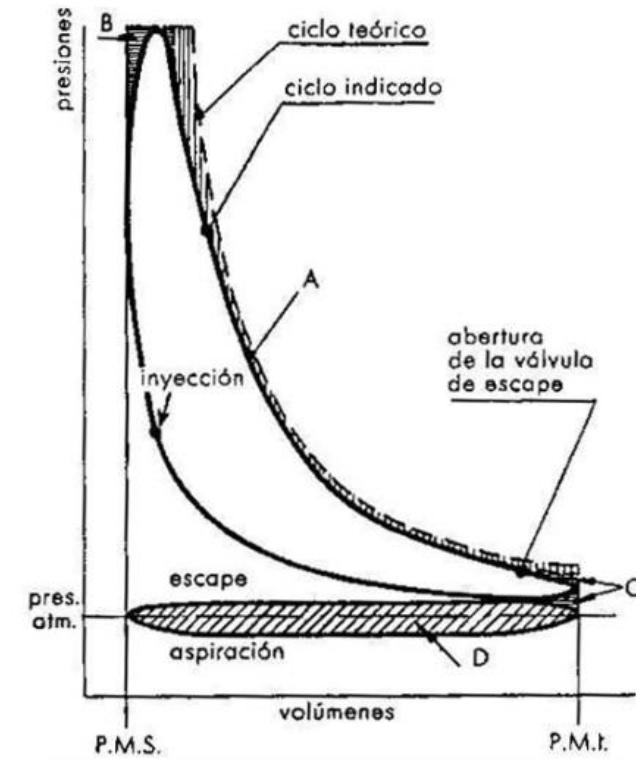


Figura 6. Diagrama indicado [9].

2.4.2 PRESIÓN

El diagrama de presión describe la evolución de la presión en la cámara de combustión frente al ángulo de cigüeñal girado. La presión en cámara está influida por el movimiento del pistón, así pues, se tienen dos curvas de presión; la presión en la cámara sin que exista la combustión, sólo debida al movimiento del pistón; y la presión con combustión, debida al movimiento del pistón y a la combustión.

Entonces, se debe considerar que, al comienzo de la admisión, el interior del cilindro tiene una presión un poco más elevada a la que hay en la atmósfera debido a que el escape no ha finalizado. Cuando el pistón se desplaza hacia el PMI (Punto muerto inferior), aspira cierta cantidad de aire a través de la válvula de aspiración. Durante toda la fase, la presión iguala a la atmosférica y en el resto de la carrera en el interior del cilindro existe una presión menor, debido a la resistencia que encuentra el gas en los conductos. Esto origina la *depresión en la aspiración*, la cual resulta más intensa cuanto mayor es la velocidad del gas.

Cuando el pistón inicia la carrera hacia el PMS (Punto muerto superior), el cilindro todavía se encuentra en depresión, por esto, y a pesar del movimiento del pistón continúa la introducción del fluido hasta que la presión interna y la atmosférica se igualan. En este punto se cierra la válvula de aspiración.

La compresión se produce debido al movimiento del pistón hacia el PMS. El fluido, a la presión atmosférica, es comprimido por el pistón, por lo que la presión aumenta.

La combustión comienza con la inyección del combustible, que ocasiona una elevación de temperatura y presión hasta su máximo valor durante todo el ciclo. La combustión finaliza cuando el pistón recorre una parte reducida de la carrera hacia el PMI.

Terminada la combustión, debido al incremento de presión, el pistón experimenta un rápido descenso hacia el PMI, pero para facilitar la expulsión de los gases, se interrumpe con la apertura anticipada respecto al PMI de la válvula de escape.

El escape inicia en el momento que comienza la apertura de la válvula correspondiente, como los gases se encuentran a una presión superior a la atmosférica, se descargan de forma rápida al exterior, que la transformación discurre casi a volumen constante. La presión cae con rapidez y debido a la inercia de los gases en los conductos de escape, la presión puede alcanzar un valor inferior a la atmosférica [14].

En la Figura 7 se observa el comportamiento general de la presión en la cámara de combustión de un motor durante un ciclo de operación

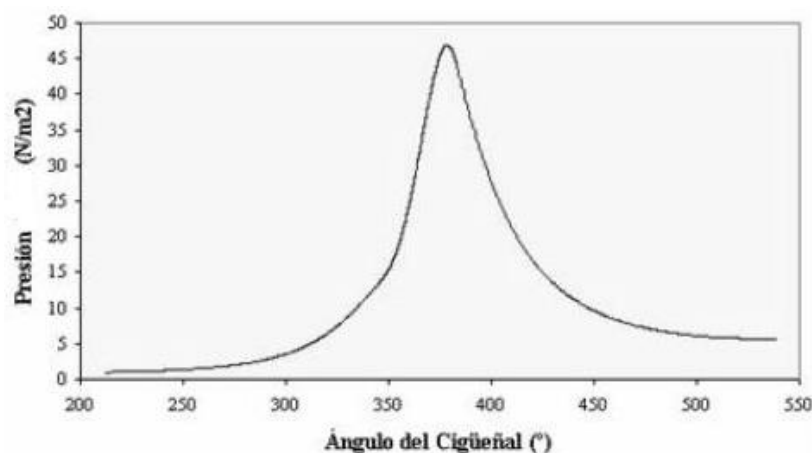


Figura 7. Curva de presión – ángulo del cigüeñal [14].

2.4.3 PAR

El par motor, también llamado torque, es una magnitud física que mide el momento de fuerza que se aplica a un eje que gira sobre sí mismo a una determinada velocidad, siendo entonces la fuerza necesaria para que el cigüeñal del motor gire y sea capaz de transmitir dicho movimiento al resto de los elementos mecánicos.

La fuerza que hace el pistón sobre el cigüeñal no es constante durante todo el proceso de expansión, debido a que dentro de cada cilindro el valor máximo de potencia se genera en el momento de la ignición del combustible, y este momento lleva consigo también momento de máximo par [14].

El par es una variable que depende de la potencia generada en la cámara de los cilindros y del número de revoluciones a las que gira el motor en un determinado momento, por lo que se puede calcular su valor a partir de:

$$P = T \cdot \omega \quad \text{Ecuación 1}$$

donde P es la potencia, T es el par y ω es la velocidad de giro radial. Sin embargo, hay factores que afectan los valores teóricos como por ejemplo los rozamientos internos del motor. Estos rozamientos hacen que parte de la potencia obtenida por el motor no sea aprovechable, sino que se pierda en el mismo proceso de movimiento del motor, normalmente en forma de calor.

El par es positivo durante el proceso de expansión de los gases, y se convierte en negativa el resto del tiempo durante cada dos vueltas [15].

La curva de par (Figura 8) puede considerarse que está dividida en dos partes, una zona de funcionamiento no flexible y otra de funcionamiento flexible. Ambas partes están limitadas por un régimen de giro que corresponde al que el motor ofrece el máximo par [14].

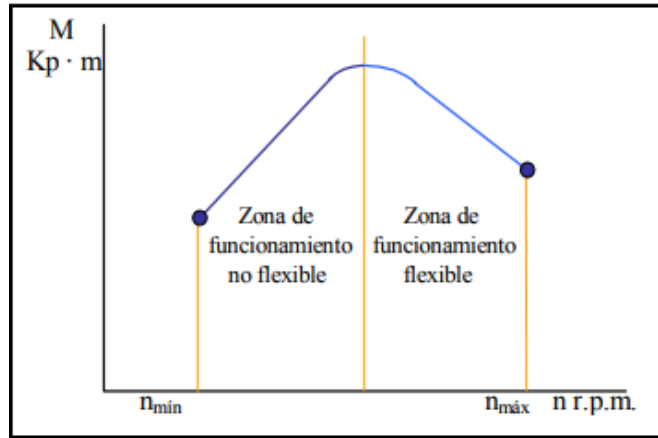


Figura 8. Curva de par – régimen de giro [14].

2.4.4 POTENCIA

El concepto de potencia se emplea para indicar la cantidad de trabajo (para el caso de un motor de combustión interna es el par o torque) que se puede realizar en una unidad de tiempo, en otras palabras, la potencia es la velocidad de cambio de energía en un sistema o el tiempo empleado en realizar un trabajo. La ecuación que para calcular la potencia es:

$$P = \frac{M \cdot 2\pi \cdot N}{60000} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde M es el par en N.m y N es la velocidad en RPM.

La curva de potencia (Figura 9) indica que, a medida que incrementa el régimen de giro, incrementa la potencia al freno de forma parcialmente lineal, lo cual ocurre solo hasta llegar a una velocidad angular del cigüeñal (velocidad nominal) en el que, por seguridad para el motor, actúa el regulador disminuyendo la entrada de combustible. A partir de dicho régimen de giro, la potencia disminuye hasta llegar a un valor que, para un alto régimen de giro, es bajo.

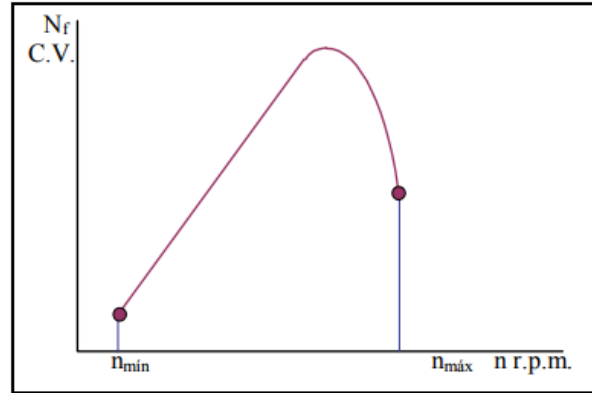


Figura 9. Curva de potencia – régimen de giro [14].

De las curvas de par y potencia se observa que la máxima potencia no corresponde al máximo par entregado por el motor. En la mayoría de los motores, el par motor máximo está en torno al 70% de la velocidad nominal, es decir, de aquel al que se produce la máxima potencia. [16]·[17]

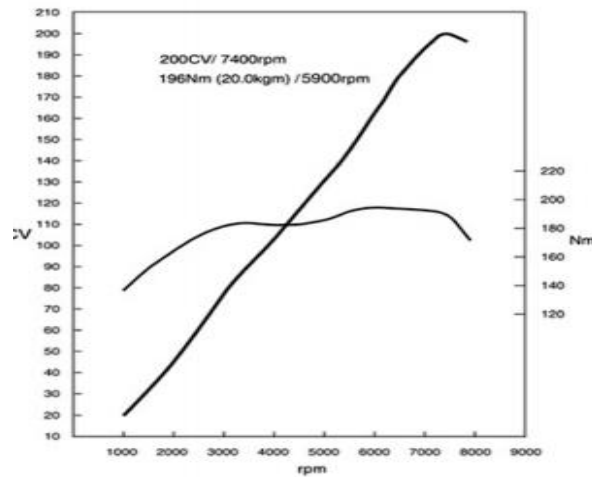


Figura 10. Curvas de par y potencia – régimen de giro [15].

2.4.5 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE

El consumo específico de combustible (Figura 11) representa el caudal de combustible que consume un motor dividido por la potencia que proporciona el motor. El caudal se mide típicamente en gramos por hora $\left[\frac{g}{h}\right]$ y la potencia, igual que en la mayoría de las aplicaciones se mide en vatios $[W]$, entonces el consumo específico se mide en $\left[\frac{g}{kW.h}\right]$. El diagrama de consumo específico de combustible representa como varía este consumo con relación al régimen de giro del cigüeñal [18]

y sirve para comparar la eficiencia de diferentes motores y para encontrar el combustible óptimo de funcionamiento para motores de diferentes tamaños, es decir, para encontrar con qué tipo de combustible se produce menor consumo y mayor cantidad de potencia para un motor en específico [19]. Para el cálculo del consumo específico de combustible, se tiene que:

$$\text{Consumo} = \frac{\bar{V} \cdot \rho \cdot 3600}{P} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde \bar{V} es el flujo de combustible en $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, ρ es la densidad de la gasolina en $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ y P es la potencia en kW.

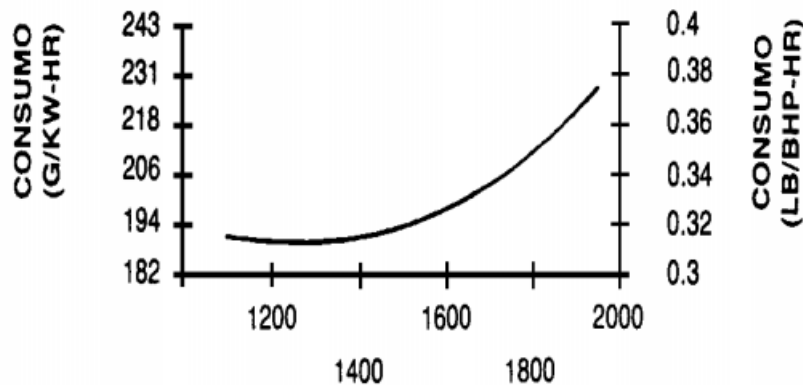


Figura 11. Diagrama de consumo específico de combustible [20].

2.5 ÁNGULO DE AVANCE

En teoría, la chispa de encendido (Figura 12) en un motor debe saltar cuando el cilindro llega al PMS en el final de la carrera de compresión, pero esto no pasa en realidad, ya que, desde que salta la chispa hasta que se produce la combustión de la mezcla transcurre un tiempo debido a la velocidad de la propagación de la llama y el tiempo que tarda en producirse la expansión de los gases debida a la reacción química producida por el incendio de la mezcla, si esta pérdida no se corrige, el motor tendrá una pérdida de potencia. El ángulo recorrido por el motor desde que se produce el salto de chispa hasta que se produce el punto de encendido varía en función de la velocidad de giro de este, por lo que necesita avanzar el encendido a medida que aumentan las revoluciones. [21]

Diagrama de un motor de combustión interna y su diagrama de presión. El diagrama superior muestra un pistón con la cámara de combustión (PMS) y el punto muerto inferior (PMI). El diagrama inferior muestra el ángulo de encendido (α_1) y el ángulo de ajuste del encendido (α_2). El diagrama de presión (P_r) muestra la presión en la cámara de combustión (P_r) en función del ángulo de giro del cigüeñal (α_1). Se indican los puntos A (antes del PMS), B (después del PMS), Z (punto de encendido) y P (presión obtenida por la compresión de la mezcla).

2.6 TRATAMIENTO DE DATOS

La estadística sirve como una herramienta para la construcción de las curvas de desempeño, siendo la estadística descriptiva el estudio de las técnicas para recopilar, organizar y presentar datos obtenidos en un estudio estadístico para facilitar su análisis y aplicación. Las medidas de tendencia central son números que definen cual es el valor alrededor del que se concentran los datos, siendo los más utilizados la media muestral, la moda muestral y mediana muestral. Las medidas de dispersión son números que proveen información adicional acerca del comportamiento de datos, describiendo numéricamente su dispersión [23].

25

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde x_i es una muestra de n datos y n es el total de datos.

La moda muestral es el dato que ocurre con mayor frecuencia en una muestra. Es posible que no existan ninguna moda o que exista más de una.

La mediana muestral es el valor ubicado en el centro de los datos ordenados.

Sean $X: X_1, X_2, \dots, X_n$ una muestra de tamaño n y $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ los elementos de la muestra ordenados en forma creciente, entonces la mediana muestral está dada por:

$$\tilde{X} = \begin{cases} X_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}, & \text{si } n \text{ es impar} \\ \frac{1}{2} \left(X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1} \right), & \text{si } n \text{ es par} \end{cases} \quad \text{Ecuaciones 5 y 6}$$

La varianza muestral cuantifica las distancias de los datos con respecto al valor de la media muestral.

2.7 PRE-PROCESAMIENTO DE SEÑALES

El pre procesamiento de señales es una etapa fundamental en el proceso de extracción de datos, cuyo objetivo principal es obtener un conjunto de señales finales que sean de calidad y de fácil manejo para utilizarlas en la fase de procesamiento de estas.

En el presente trabajo, para el pre-procesamiento de las señales, se hace un normalizado y segmentado que da como resultado señales más limpias, que hacen que su manejo sea mejor en la etapa de procesamiento, además, se busca que las señales estén estandarizadas y puedan ser comparadas entre sí.

En la etapa de normalización de señales se tiene una fase:

- Eliminación del nivel DC

La eliminación del nivel DC se aplica para la señal de presión, donde se normaliza la amplitud, considerando el nivel *offset* generado por la naturaleza del sensor y la presión atmosférica local.

La figura muestra una señal de presión normalizada, capturada en un lugar con $P_{\text{atm}} = 86 \text{ kPa}$.

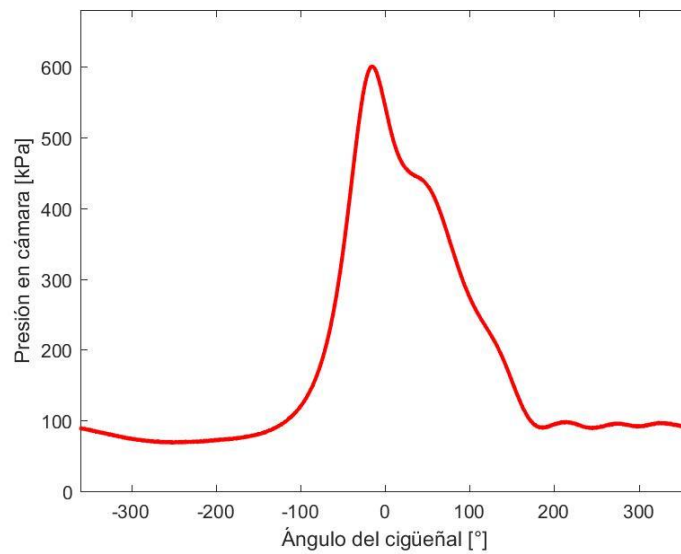


Figura 13. Señal normalizada.

En la segmentación de señales se tienen 3 fases:

- Detección del PMS
- Generación de los marcadores de ciclo
- Segmentación

La detección de PMS ubica el PMS cuando el espacio de la rueda dentada pasa por el sensor.

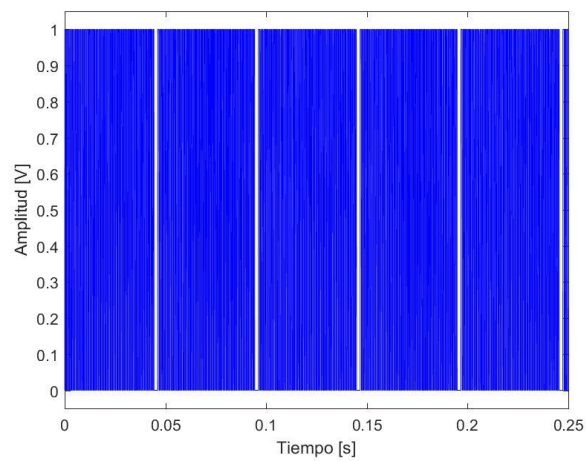


Figura 14. Detección del PMS.

La generación de los marcadores del ciclo marca los ciclos en las señales cada 720° , o sea, cuando ocurren las 4 fases de cada ciclo.

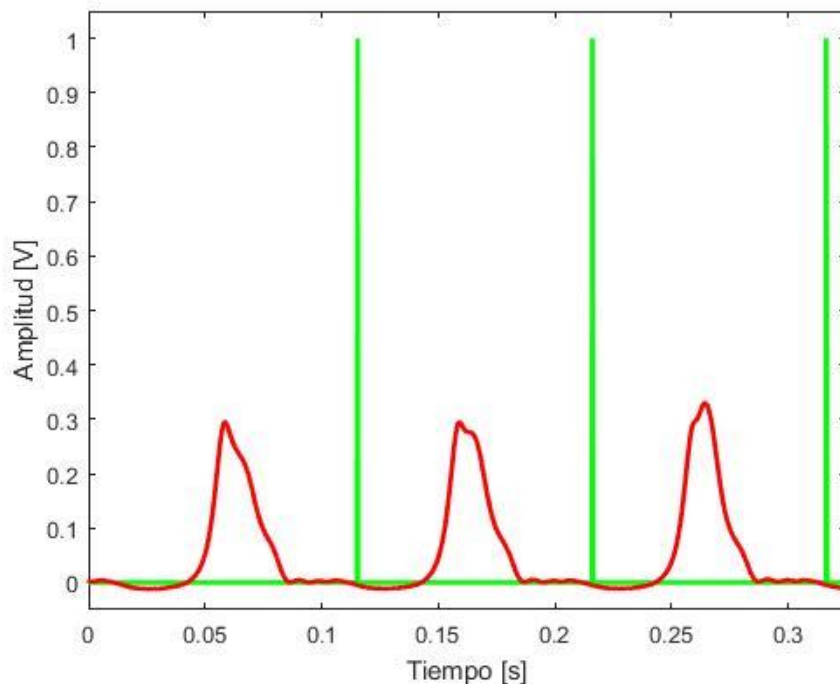


Figura 15. Marcadores de ciclo.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En este capítulo se presentan conceptos básicos sobre el diseño de experimentos y se determinan las variables relevantes para el desarrollo de la presente investigación.

El diseño de experimentos se define como un conjunto de técnicas empleadas, como su nombre lo indica, en la realización de un experimento en el cual, una serie de señales adquiridas son manipuladas o tratadas para la obtención de unos resultados determinados. El diseño de experimentos sirve para determinar los factores en un proceso de investigación que tienen impacto sobre los resultados.

Existen diferentes tipos de diseño de experimentos, la utilización de cada uno de estos depende del tipo de investigación a realizar, los tipos son: diseños para comparar dos o más tratamientos, diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s), diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso, diseños para la optimización de una mezcla y diseños para hacer el producto o proceso insensible a los factores no controlables [24].

3.1 TÉRMINOS IMPORTANTES

3.1.1 FACTOR: variables a medir en el desarrollo del experimento, pueden ser controlables, no controlables.

3.1.2 NIVEL: valores que se asignan a cada factor estudiado, para que el un factor pueda ser estudiado requiere ser probado mínimo en dos niveles.

3.1.3 ERROR: variabilidad inesperada en la respuesta, puede ser de tipo aleatorio o experimental, el primero corresponde a las condiciones que no son inherentes al experimento y por lo tanto no puede ser explicado por los factores estudiados, el segundo corresponde a errores cometidos por el experimentador.

3.1.4 RATIO F: valor de respuesta que realiza la comparación de las medias de cada factor e indica si los resultados obtenidos para cada uno de ellos presentan o no diferencias estadísticamente significativas.

3.1.5 SIGNIFICANCIA (α): probabilidad de la región o intervalo de rechazo, depende del riesgo que se quiera admitir en la conclusión, comúnmente lleva valores de $\alpha = 0.05$ o $\alpha = 0.01$, el valor depende del costo que implique la realización del experimento.

3.1.6 GRADOS DE LIBERTAD (gl): número de observaciones que son libres de variar.

Para que una investigación pueda ser realizada con base en la teoría del diseño de experimentos se deben considerar tres principios básicos. Estos son: la aleatorización, esta indica que cada una de las pruebas a realizar sea corrida de manera aleatoria, es decir, que no existan condiciones que favorezcan los resultados y que los factores no controlables sean distribuidos de manera homogénea. La repetición, para poder realizar un análisis estadístico de un experimento se requiere que este sea corrido al menos dos veces. Bloqueo, consiste en anular todos aquellos factores externos a la investigación que puedan interferir de manera significativa en la respuesta observada [24].

3.2 CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS A UTILIZAR

Para la selección del diseño de experimentos a utilizar se deben tener en cuenta 5 aspectos fundamentales, estos son:

- Objetivo del experimento.

- El número de factores a estudiar.
- El número de niveles que se prueban en cada factor.
- Los efectos que interesa investigar.
- El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Para el desarrollo de este experimento y como se menciona en repetidas ocasiones, se pretende construir las características externas de un motor de combustión interna y para ello se estudian dos factores principales, el primero son las revoluciones y el segundo es la carga. Con base a estos dos factores se analiza posteriormente (cuando ya se hayan construidos las curvas que describen las características externas del motor) como influye el cambio en los niveles tanto de velocidad como de carga en la variación de las características externas del motor (presión, potencia, par y consumo de combustible). Se podría decir entonces que el objetivo de este experimento sería estudiar el efecto de varios factores sobre las variables de respuesta. El segundo de los tipos diseños de experimentos mencionados al inicio de este capítulo [24].

Los diseños de experimentos para estudiar el efecto de varios factores sobre una respuesta se subdividen a su vez en:

- Diseños factoriales 2^k .
- Diseños factoriales 3^k .
- Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p} .

Se realizará entonces en el desarrollo de esta investigación un diseño factorial. Cuando los factores a estudiar tienen diferentes niveles, el nombre del experimento será la multiplicación del número de niveles de cada factor. Como en este caso se estudiarán las revoluciones y la carga, uno con 5 niveles y el otro con dos, respectivamente, se tiene entonces un diseño de experimentos $5 * 2 = 10$, donde el resultado representa el número de combinaciones posibles.

Debido a que la teoría del diseño de experimentos indica que para realizar un análisis estadístico se requiere que el experimento sea repetido al menos dos veces se realizarán tres corridas, es decir que el experimento tendrá tres réplicas [24].

Velocidad [RPM]	Carga
1200	Baja
	Alta
1800	Baja
	Alta
2400	Baja
	Alta
3000	Baja
	Alta
3500	Baja
	Alta

Tabla 1. Combinación de pruebas a realizar.

En la *Tabla 1* se observan las 10 combinaciones a realizar, en cada una de las combinaciones o puntos de diseño se tomarán diferentes variables de respuesta, tales como, presión, fuerza, revoluciones, entre otras. Empleando el sistema de carga mencionado en el siguiente capítulo se tiene que para carga baja se utiliza una corriente de 0.5 A y para carga alta 1.5 A.

CAPÍTULO 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan las características generales del motor evaluado, las modificaciones realizadas en la etapa de instrumentación para operar el motor con combustibles de encendido por chispa, los sensores utilizados, las tarjetas de adquisición, el chasis, el computador y el software utilizado. Se muestra también el montaje de los elementos en el motor y las conexiones realizadas para la adquisición de datos en la Figura 16.

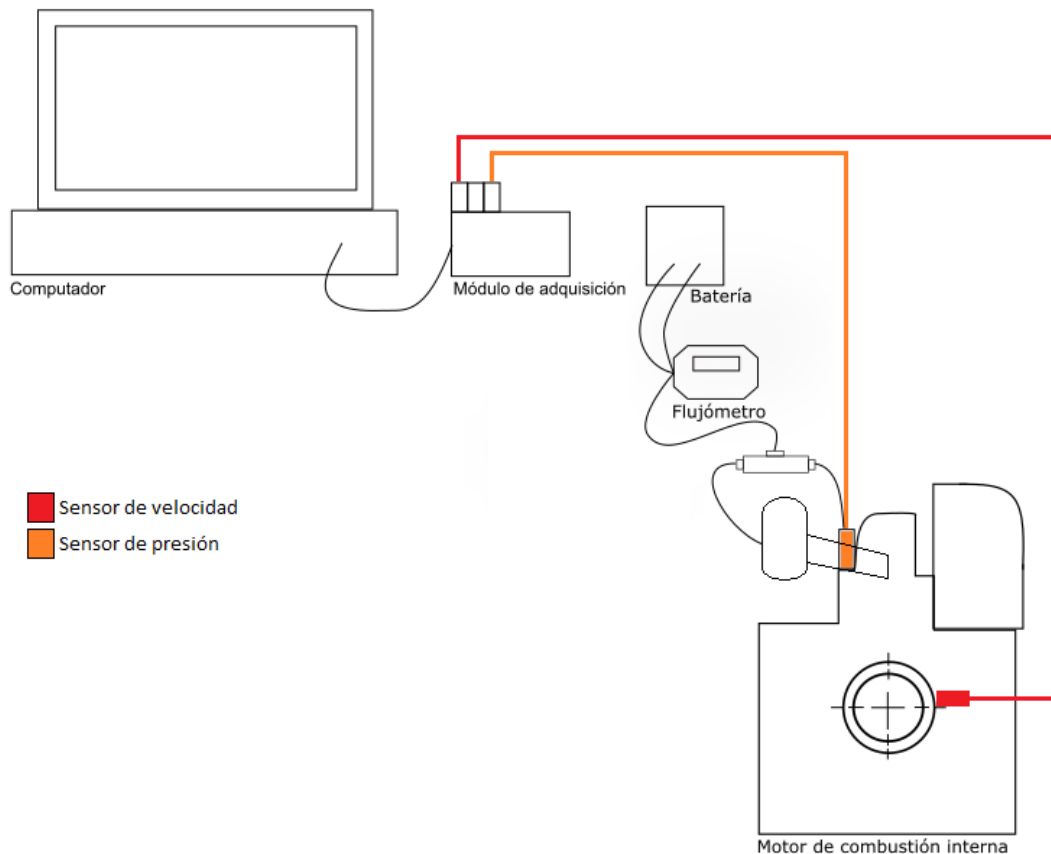


Figura 16. Montaje experimental del MCI para toma de datos.

4.1 MOTOR

El motor usado para el desarrollo del presente proyecto es un motor mono cilíndrico de encendido por compresión CHANGFA 186F (Figura 17) ubicado en el laboratorio de motores de la Universidad Tecnológica de Pereira, normalmente utilizado en obras civiles, generación de energía eléctrica y en labores agrícolas. En la Tabla 2 se muestran algunas características generales del motor Changfa.



Figura 17. Motor Changfa [25].

MOTOR CHANGFA 186F	
MODELO	CF186F
TIPO	Vertical - Mono cilíndrico - 4 Tiempos - Diésel refrigerado por aire
SISTEMA DE COMBUSTIÓN	Inyección directa
DIÁMETRO X CARRERA	86 mm x 70 mm
DESPLAZAMIENTO TOTAL	0.406 L
RELACIÓN DE COMPRESIÓN	20
CAPACIDAD NOMINAL	6.50 kW (8.8 HP) 3600 r/min
CAPACIDAD MÁXIMA	7.30 kW (10.0 HP) 3600 r/min
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	Aire forzado enfriado
SISTEMA DE LUBRICACIÓN	Splash
SISTEMA DE ARRANQUE	Retroceso / Arranque eléctrico (Opcional)
PESO NETO	48 kg
VOLUMEN DEL TANQUE DE ACEITE	5.5 L
VOLUMEN DE LUBRICANTE	1.65 L
SISTEMA DE ARRANQUE RECOMENDADO	Sobre 12 V - 36 AH (Para arranque eléctrico únicamente)
DIMENSIONES	417 mm x 470 mm x 494 mm

Tabla 2. Características generales del motor evaluado.

4.2 ACONDICIONAMIENTO DEL MOTOR

Desde trabajos realizados anteriormente por el grupo de investigación en procesos de manufactura y diseño de máquinas [26] , se realizaron unas modificaciones al motor con el fin de:

- Lograr que el motor funcionara con combustibles de encendido por chispa
- Facilitar la instalación de sensores para medir las variables

Con las modificaciones es posible adquirir señales de velocidad, posición angular del cigüeñal, presión en cámara de combustión, par y consumo de combustible.

Sistema de encendido por chispa. Debido a que el motor CHANGFA era únicamente de encendido por compresión, fue necesario modificarlo para operar con combustibles de encendido por chispa. Para este propósito, se utilizaron tres alternativas y fue necesario retirar el sistema de arranque manual (Figura 18) para instalar el sistema de encendido.



Figura 18. Motor CHANGFA sin sistema de arranque.

Primero se instaló un sistema con distribuidor, el cual se fijó al bloque del motor por medio de láminas dobladas y, se acopló su rotor al cigüeñal por medio de otra lámina fijada a la copa de embrague del encendido manual del motor (Figura 19).

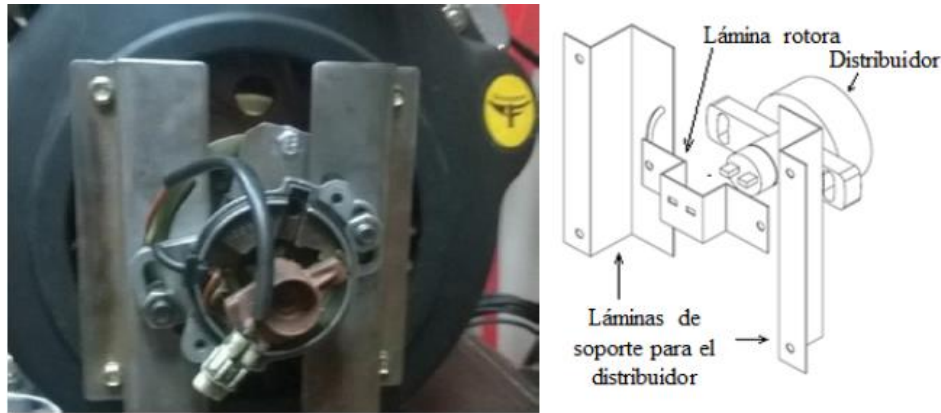


Figura 19. Montaje del sistema con distribuidor y detalle.

Luego, se instaló un sistema de encendido de una desmalezadora (Figura 20), el cual solo constó de dos componentes (volantes y bobina integrada). La bobina se fijó por medio de una placa con ranuras para desplazarla en una trayectoria circular, permitiendo el adelanto o atraso del salto de chispa de encendido y la volante fue fijada a la misma copa en la que se fijó la parte móvil del distribuidor de anterior sistema y fue centrada utilizando un comparador de carátula, logrando una oscilación máxima de 0,001 pulgadas.



Figura 20. Encendido desmalezadora Goldstar.

Por último, se instaló un sistema electrónico de encendido cuyo rotor fue instalado por medio de una pieza mecanizada atornillada al cigüeñal, se realizó el centrado con un comparador de carátula logrando una máxima oscilación de 0,003 pulgadas evitando así las vibraciones no deseadas (Figura 21), los componentes de este sistema fueron conectados según las indicaciones del

fabricante (Figura 22) y fue probado logrando encender el motor con gasolina. Este sistema tiene como ventaja la fácil modificación del ángulo de la chispa.

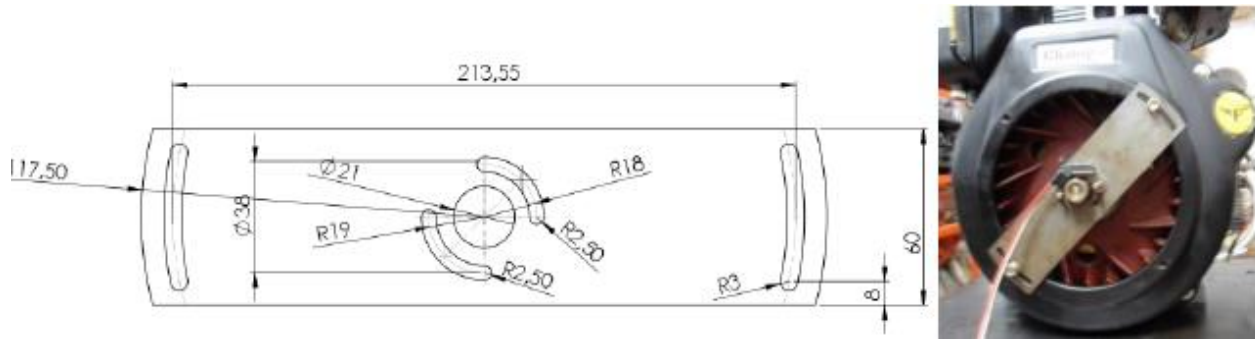


Figura 21. Platina base y montaje.

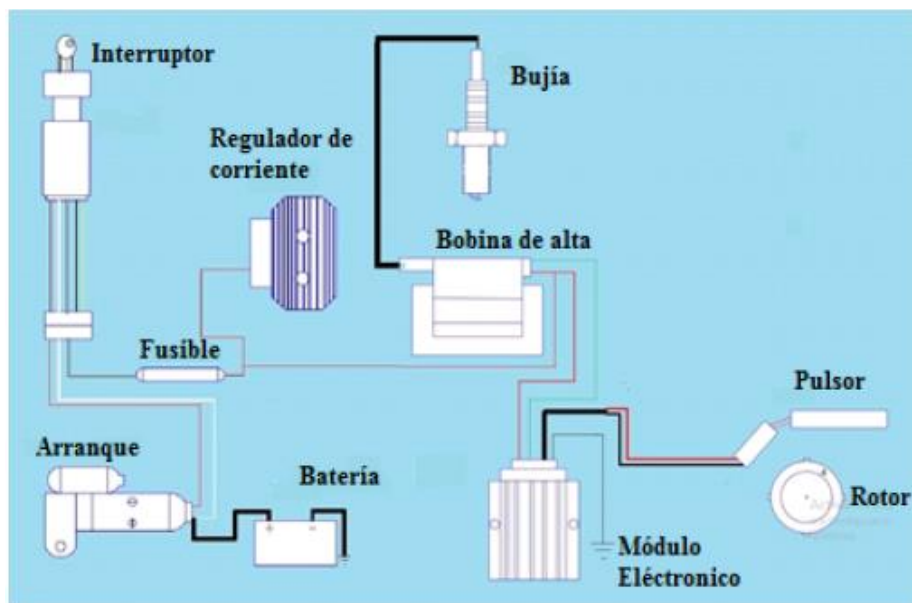


Figura 22. Diagrama de conexión.

Sistema de carga. La carga del motor se modifica utilizando un dinamómetro de “corrientes de Eddy” (Figura 23). Su principio de funcionamiento es un mecanismo de freno que utiliza la inducción electromagnética para crear el fenómeno conocido como corriente de Foucault, creando una serie de resistencias aprovechadas para el motor [27]. En la *Tabla 3* se muestran las características generales del dinamómetro.



Figura 23. Dinamómetro CFK – 200 [28].

Rango de aplicación (GVW)		15 - 18
Máximo torque de freno	12 V	1650 Nm
	24 V	2000 Nm
Masa	Completo	232 kg
	Estator	154 kg
	Rotor	78 kg
Inercia del rotor		2,69 kgm ²
Torque máximo transmisible		31600 Nm
Velocidad máxima de giro		3600 RPM
Espacio para regulación de aire		1,4 mm

Tabla 3. Características del dinamómetro.

La *Figura 24* muestra las dimensiones principales del acople entre el motor utilizado y el dinamómetro utilizado.

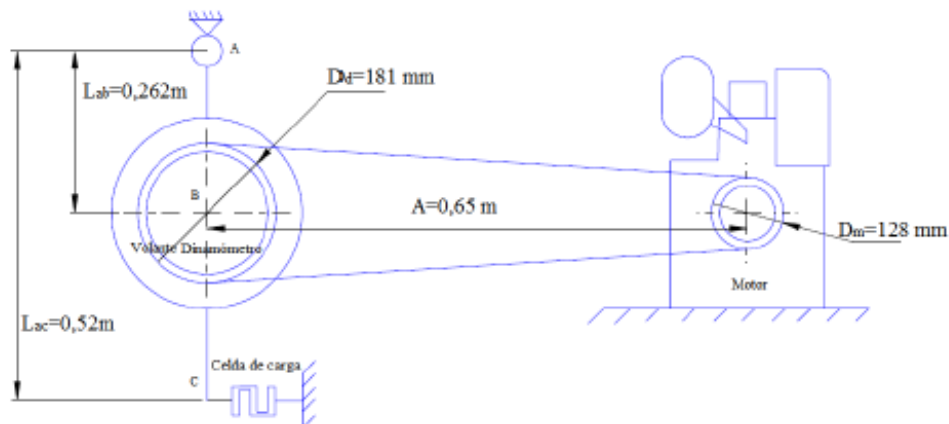


Figura 24. Dimensiones principales del sistema de carga.

En la *Figura 25* se presenta el diagrama de cuerpo libre del motor y el dinamómetro, donde F_1 es la fuerza realizada por el ramal tenso de la transmisión por correas y F_2 del ramal flojo, F_A es la reacción en el pivote del dinamómetro, F_0 es la tensión inicial de las correas, la cual se mide por medio de la celda de carga (esta se mide con el motor apagado), F_C es la fuerza medida en la celda de carga y M es el valor del momento en el eje de salida del motor.

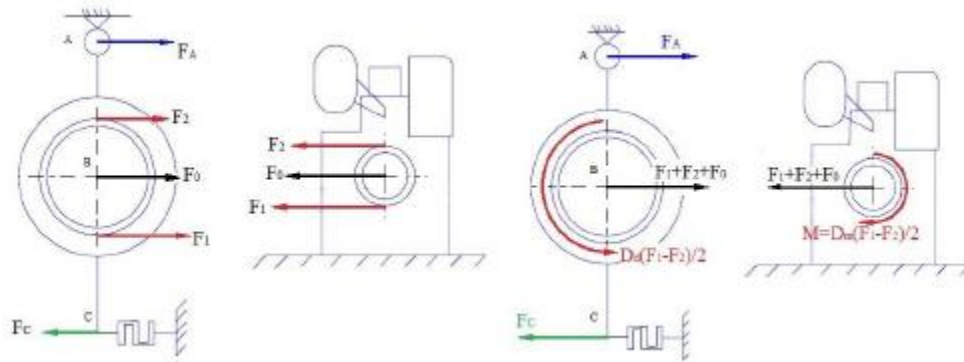


Figura 25. Diagrama de cuerpo libre del motor y el dinamómetro.

La relación matemática usada para calcular el par en el eje del motor se presenta en la ecuación 9 [29].

$$M = \frac{(L_{AC}F_C - L_{AB}F_0)}{L_{AB}\left(\frac{R+1}{R}\right) + \frac{D_d}{2}\left(\frac{R-1}{R}\right)} \cdot \frac{D_m}{2} \left(\frac{R-1}{R}\right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde M es el momento entregado por el motor, L_{AC} es la distancia entre el pivote del dinamómetro y la celda de carga, L_{AB} es la distancia entre el pivote del dinamómetro y el centro de la polea de este, D_d es el diámetro de la polea del dinamómetro, D_m es el diámetro de la polea del motor ($D_m < D_d$) y R es la relación de fuerzas entre el ramal tenso y el ramal flojo de la transmisión por correa.

Adaptaciones para la medición de velocidad de giro. En la polea ubicada en el eje de salida del motor, se instaló una rueda dentada para medir la posición angular del cigüeñal y se adhirió una cinta reflectiva para medir las revoluciones con un tacómetro digital (*Figura 26*). La rueda dentada instalada con este propósito es fónica 60-2, lo cual indica que a la rueda original de 60 dientes se le retiran dos con el fin de ubicar cada revolución.

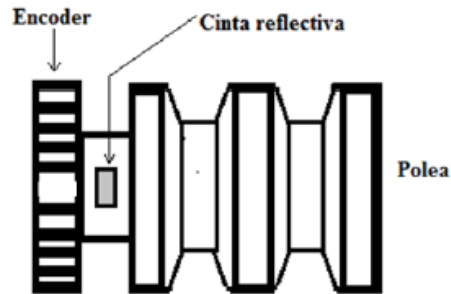


Figura 26. Polea instalada.

Se instaló un sensor de efecto Hall, el cual mide campo magnético o corriente para determinar la posición angular del cigüeñal mediante pulsos creados por un voltaje proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente (*Figura 27*)

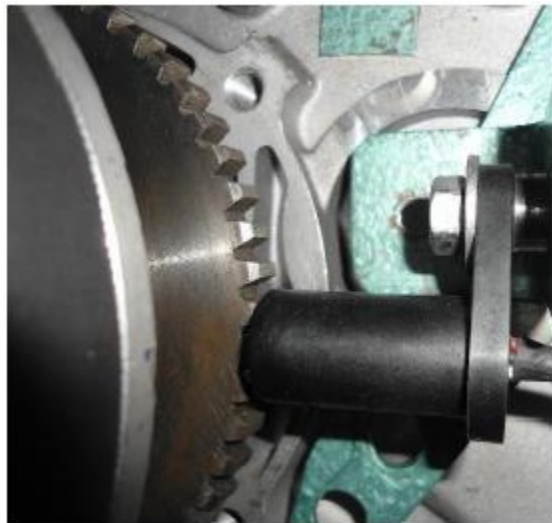


Figura 27. Sensor de posición efecto Hall instalado en el motor del banco de pruebas.

En la *Tabla 4* se muestran algunas características del sensor de posición angular.

Sensor de posición angular	
Alimentación [V]	4,75 – 24
Tipo de onda	Cuadrada
Frecuencia máxima [Hz]	15
Máxima separación del encoder [mm]	5

Tabla 4. Datos generales sensor de posición angular.

Se utilizó el tacómetro SKF (Figura 28) para medir la velocidad angular del motor aproximada y tener referencia a la hora de adquirir los datos, luego, las revoluciones del motor puedan ser verificadas mediante los datos del sensor de efecto Hall.



Figura 28. Tacómetro digital multifunción.

En la *Tabla 5* se muestran algunas características del tacómetro.

Tacómetro	
Tipo	Óptico/láser
Rango óptico [cm]	5 – 200
Rango de velocidad [RPM]	3 – 99999
Resolución [RPM]	1

Tabla 5. Datos generales del tacómetro.

Variación de la relación de compresión. La obtención de la relación de compresión variable se alcanza mediante la variación del volumen muerto o, a partir del cambio en el punto muerto superior (PMS). Para variar la relación de compresión del motor del banco de pruebas se colocaron discos para modificar dicho volumen. En el presente trabajo se utilizaron dos relaciones de compresión, una de 9:1 (Figura 29) y la otra de 11:1 (Figura 30), debido a que, en trabajos de grados realizados anteriormente, se encontró que las relaciones de compresión que presentaron mejor comportamiento para ambos combustibles fueron estos [26].

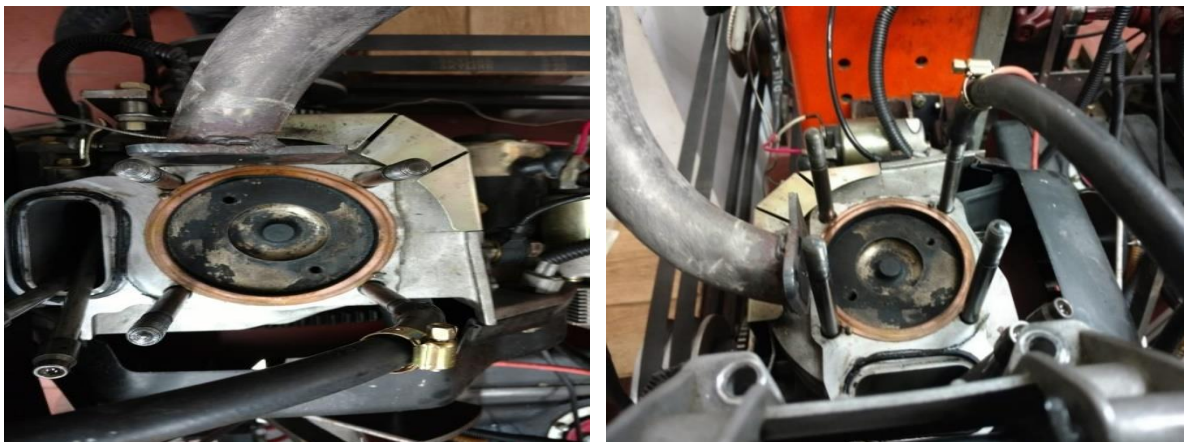


Figura 29. Motor con relación de compresión de 9:1.

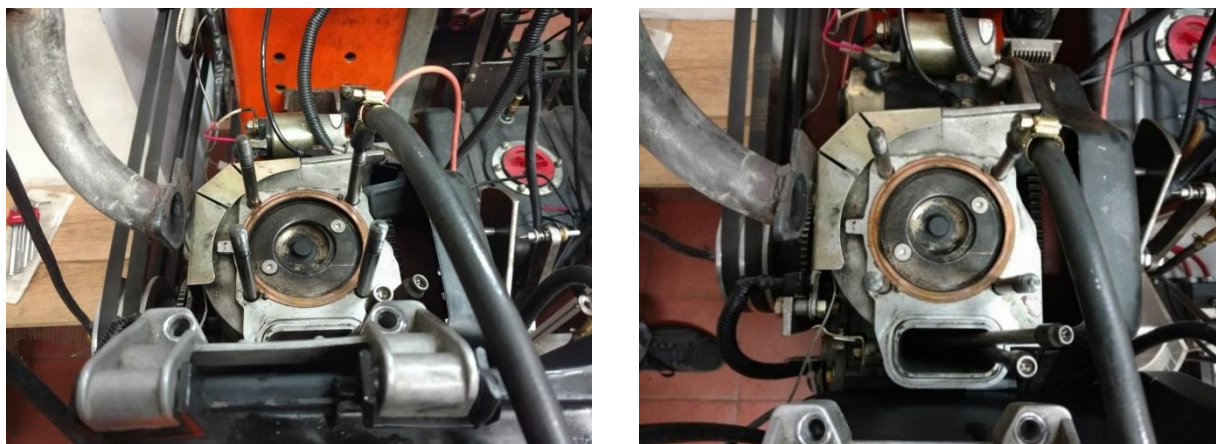


Figura 30. Motor con relación de compresión de 11:1.

4.3 SENSORES

Un sensor es todo aquello que tiene una propiedad sensible a una magnitud del medio, y al variar esta magnitud también varía con cierta intensidad la propiedad, es decir, manifiesta la presencia de dicha magnitud, y también su medida.

A continuación, se presentan unas características generales sobre los sensores utilizados para el desarrollo del trabajo: sensor de velocidad, sensor de presión y sensor de caudal.

4.3.1 SENSOR DE VELOCIDAD

Los sensores de velocidad (*Figura 31*) de rotación y de velocidad lineal miden el trayecto recorrido por unidad de tiempo. En ambos casos, se trata de magnitudes de medición relativa que aparecen entre dos piezas.

Para la detección de la velocidad de rotación se hace una distinción, según el número y el tamaño de las marcas periféricas exploradas de un rotor.

- Sensor de velocidad de rotación sencillo: con la ayuda de una sola marca, detecta únicamente la velocidad media de rotación por vuelta.

La medición se efectúa generalmente con un sistema detector incremental, compuesto de rueda dentada y sensor tacométrico.

Los sensores se basan en efectos de medición muy pequeños (p. ej. Hall) y requieren una electrónica integrada. Los detectores de velocidades de rotación requieren incluso una electrónica muy compleja directamente en el sensor, pues los efectos de medición utilizados no sólo son muy pequeños, sino que necesitan también una compleja regeneración de señales.

Para la medición incremental de la velocidad de rotación se pueden aprovechar efectos físicos como el efecto Hall.



Figura 31. Sensor de velocidad [30].

El efecto Hall es una medición de voltaje en un conductor cuando es colocado en un campo magnético. Mediante este efecto es posible determinar el tipo, concentración y movilidad de portadores en silicio. Aparece una separación de cargas que da lugar a un campo eléctrico en el interior del conductor perpendicular al movimiento de cargas y al campo magnético aplicado.

Si por un material conductor, circula una corriente y estando este mismo en el seno de un campo magnético, aparece una fuerza magnética en los portadores de carga que los reagrupa dentro del material, esto es, los portadores de carga se desvían y agrupan a un lado del material conductor, apareciendo un campo eléctrico perpendicular al campo magnético.

Este campo eléctrico es denominado campo Hall y ligado a él aparece la tensión Hall.

Sea el material por el cual circula una corriente eléctrica con una velocidad v y que se le aplica un campo magnético B . Aparece una fuerza magnética F_m , los portadores se agrupan en una región del material, ocasionando una tensión VH y, por lo tanto, un campo eléctrico.

4.3.2 SENSOR DE PRESIÓN

El sensor de presión (*Figura 32*) se emplea para medir la presión en la cámara de combustión de los motores de combustión interna. La presión es casi independiente de la carga y de la velocidad de rotación.

Para la realizar las pruebas se empleó un sensor Kistler de tipo 7061B que cuenta con un sistema de refrigeración que permite que este sea utilizado de manera continua gracias a que evita el riesgo de que sufra algún tipo de daño por sobrecalentamiento, además, se utilizó también un amplificador de carga Kistler de tipo 5011, responsable de recibir la señal de carga enviada por el sensor y transformarla en un voltaje para de esa manera visualizarla en un computador.

El sensor registra la presión mediante resistencias piezorresistivas integradas en una membrana de acero. El funcionamiento radica en la flexión de la membrana por la acción de la presión del combustible que fluye.

Con altas presiones, la membrana sufre una gran deformación, provocando la reducción del valor de las resistencias y, por lo tanto, un aumento de la señal de tensión de salida.

Con bajas presiones, la membrana sufre una pequeña deformación, aumentando el valor de las resistencias y, por lo tanto, una reducción de la señal de tensión de salida.



Figura 32. Sensor de presión [31].

4.3.4 SENSOR DE CAUDAL

El sensor de caudal se utiliza para medir el consumo de combustible. Este sensor consta de un medidor de velocidad tipo turbina. Este tipo de medidores cuentan en su interior con un elemento giratorio donde las revoluciones que indique serán proporcionales a la velocidad del flujo, el número de giros se transmite mecánicamente a un medidor de flujo (*Figura 33*), el cual muestra el volumen acumulado [32].

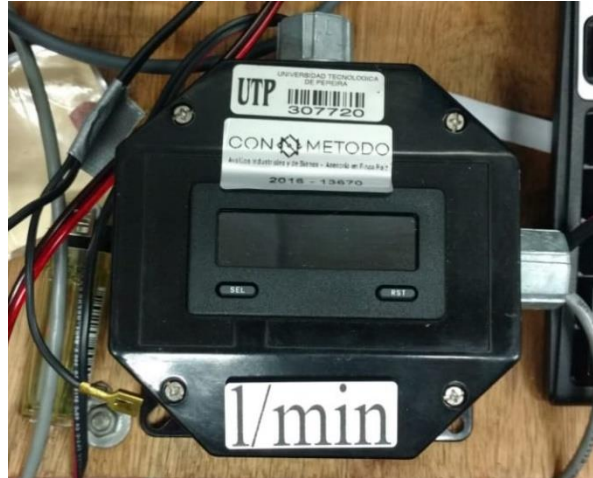


Figura 33. Medidor de flujo.

4.4 TARJETAS DE ADQUISICIÓN

Las tarjetas de adquisición son herramientas que actúan como interfaz entre la computadora y las señales físicas. Sirven para obtener una muestra de una variable física (voltaje, temperatura, nivel de sonido), es decir, toman una señal de un sensor (sistema analógico) y después la adecuan para transformarla en un dato que pueda ser reconocido y registrado por un sistema digital, con el fin de que la pueda leer la computadora y realizar una tarea en específico mediante un software. Las tarjetas de adquisición utilizadas en el trabajo fueron las NI 9232 y NI 9234, cuyas características generales se presentan en la *Tabla 6* y la *Tabla 7*.

TARJETA NI 9232

CARACTERISTICAS DE ENTRADA	
Número de canales	3 canales de entrada análogos
Resolución ADC	24 bits
Tipo de ADC	Delta - Sigma (con prefiltrado análogo)
Modo de muestreo	Simultáneo
Tipo de TEDS soportado	IEEE 1451.4 TEDS Clase I
Capacidad drive TEDS	3000 pF
Base de tiempo interna (fm)	
Frecuencia	13.1072 MHz
Resolución	± 100 ppm

Tabla 6. Ficha técnica de la tarjeta de adquisición NI 9232.

TARJETA NI 9234

CARACTERISTICAS DE ENTRADA	
Número de canales	3 canales de entrada análogos
Resolución ADC	24 bits
Tipo de ADC	Delta - Sigma (con prefiltrado análogo)
Modo de muestreo	Simultáneo
Tipo de TEDS soportado	IEEE 1451.4 TEDS Clase I
Capacidad drive TEDS	3000 pF
Base de tiempo interna (fm)	
Frecuencia	13.1072 MHz
Resolución	± 50 ppm

Tabla 7. Ficha técnica de la tarjeta de adquisición NI 9234.

En la *Figura 34* se muestran las tarjetas de adquisición.



Figura 34. Tarjetas de adquisición.

4.5 EJECUCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para concluir con el proceso del diseño de experimentos seleccionado la teoría indica que se debe realizar un análisis de varianza o ANOVA, que busca hallar resultados mediante la comparación de medias.

Para la realización del análisis de varianza se tendrá en cuenta únicamente la variable de respuesta presión y se hará para ambas relaciones de compresión empleadas en la toma de señales. En la *Tabla 8* y en la *Tabla 9* se muestran el promedio de presiones obtenidas para cada combinación de factores utilizada, cada combinación con sus tres réplicas, con ambas relaciones de compresión. Se toma el promedio debido a que la señal que se adquiere entrega 500.000 datos en cada prueba y se necesita un único valor en la variable de respuesta para cada combinación realizada.

RC 9				
Velocidad [RPM]	Carga [A]	Presión [V]		
1200	0,5	0,28017	0,22844	0,03314
	1,5	0,37133	0,05965	0,04964
1800	0,5	0,26284	0,25096	0,03605
	1,5	0,40343	0,05832	0,04634
2400	0,5	0,25215	0,26241	0,03706
	1,5	0,40461	0,06370	0,05413
3000	0,5	0,26374	0,28260	0,03548
	1,5	0,44133	0,05779	0,05584
3500	0,5	0,27693	0,30137	0,06327
	1,5	0,47856	0,06318	0,05889

Tabla 8. Resultados de presión RC 9.

RC 11				
Velocidad [RPM]	Carga [A]	Presión [V]		
1200	0,5	0,08192	0,03683	0,03756
	1,5	0,05278	0,05906	0,05806
1800	0,5	0,04189	0,03929	0,03827
	1,5	0,05962	0,06411	0,06267
2400	0,5	0,04472	0,04213	0,04068
	1,5	0,06100	0,06698	0,06884
3000	0,5	0,04804	0,04432	0,04268
	1,5	0,06565	0,07105	0,06838
3500	0,5	0,05270	0,04862	0,04952
	1,5	0,06784	0,07841	0,07665

Tabla 9. Resultados de presión RC 11.

4.3 SOLUCIÓN Y RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS IMPLEMENTADO

El diseño de experimentos se ejecuta mediante un software de cálculo estadístico llamado IBM SPSS, para este caso se utiliza un valor de $\alpha = 0.05$ que viene seleccionado en el software por defecto, para cada una de las diferentes relaciones de compresión, del cual se obtienen los resultados que se presentarán a continuación.

4.3.1 RESULTADOS PARA RC 9

Variable dependiente: Presión [V]

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta al cuadrado parcial	Parámetro de no centralidad Parámetro	Potencia observada ^b
Modelo corregido	,006 ^a	9	,001	,023	1,000	,010	,209	,055
Intersección	1,021	1	1,021	33,204	,000	,624	33,204	1,000
RPM	,005	4	,001	,040	,997	,008	,162	,056
Carga	,001	1	,001	,043	,837	,002	,043	,055
RPM * Carga	,000	4	3,085E-005	,001	1,000	,000	,004	,050
Error	,615	20	,031					
Total	1,642	30						
Total corregida	,621	29						

a. R cuadrado = .010 (R cuadrado corregida = -.435)

b. Calculado con alfa = .05

Tabla 10. Resultados diseño de experimentos RC 9.

En *Tabla 10* se pueden observar los ratios F que indican la interacción de cada uno de los factores en la variable de respuesta (presión), estos al ser comparados con el valor de significancia seleccionado para la realización del experimento ($\alpha = 0.05$) indican si los factores estudiados influyen de manera estadísticamente significativa sobre la variable de respuesta, así: si $F > 0.05$,

existe un efecto principal significativo en la variable de respuesta. Por lo tanto, para una relación de compresión de 9:1 se observa que ninguno de los factores estudiados influye de manera significativa sobre la variación en la presión.

4.3.2 PARA RC 11

Variable dependiente: Presión

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta al cuadrado parcial	Parámetro de no centralidad Parámetro	Potencia observada ^b
Modelo corregido	,004 ^a	9	,000	5,396	,001	,708	48,565	,992
Intersección	,093	1	,093	1224,368	,000	,984	1224,368	1,000
RPM	,000	4	,000	1,406	,268	,219	5,623	,357
Carga	,003	1	,003	37,410	,000	,652	37,410	1,000
RPM * Carga	,000	4	,000	1,383	,275	,217	5,532	,351
Error	,002	20	7,595E-005					
Total	,098	30						
Total corregida	,005	29						

a. R cuadrado = .708 (R cuadrado corregida = .577)

b. Calculado con alfa = .05

Tabla 11. Resultados diseño de experimentos RC 11

Se realiza la lectura de los resultados de la misma manera que en el numeral anterior, así: si $F > 0.05$, existe un efecto principal significativo en la variable de respuesta. Por lo tanto, para una relación de compresión de 11:1 se puede decir que ambos factores estudiados influyen de manera significativa sobre la variable de respuesta presión, como se observa en la *Tabla 11*.

CAPÍTULO 5. FASE EXPERIMENTAL

En este capítulo se explica la realización de las pruebas en el banco del motor, se utilizan las técnicas de preprocesamiento y procesamiento para el análisis de las señales tomadas.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El banco de pruebas está adecuado para medir las siguientes variables del motor:

- Presión en cámara de combustión
- Fuerza en la celda de carga
- Posición angular del cigüeñal
- Consumo de combustible

En el presente trabajo se midieron variables que permiten conocer las características externas del motor, por tal motivo, se midió la presión en la cámara de combustión, el par torsor, la posición angular del cigüeñal y el consumo de combustible. Por medio de las señales obtenidas en las pruebas se realizaron gráficos de las mediciones realizadas, con el fin de mostrar el comportamiento del motor de combustión interna.

5.1.1 METODOLOGÍA

Para la realización de la prueba se manipularon seis variables del motor:

- Relación de compresión
- Combustible
- Nivel de carga del motor
- Apertura de la válvula de mariposa
- Ángulo de avance de la chispa
- Velocidad de operación

Inicialmente, se hallan puntos de régimen de operación específicos que estos conserven una relación estequiométrica constante. Para hallar estos puntos fue necesario variar el ángulo de avance de la chispa, el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa y el tiempo de inyección para cada valor de carga. En la *Tabla 12* y la *Tabla 13* se muestran los valores aproximados encontrados para cada carga (ANEXO 1).

Carga Baja		
Revolución [rpm]	Ángulo de avance [°]	Apertura de mariposa [%]
1200	20	16
1800	23	22
2400	27	25
3000	33	29
3500	35	34

Tabla 12. Datos de régimen de giro a trabajar para carga baja

Carga Alta		
Revolución [rpm]	Ángulo de avance [°]	Apertura de mariposa [%]
1200	18	26
1800	21	33
2400	28	36
3000	34	40
3500	36	45

Tabla 13. Datos de régimen de giro a trabajar para carga alta

Después de encontrados los puntos de régimen de giro con los que se trabajó, se fijó la relación de compresión 9:1, se trabajó con gasolina corriente y posteriormente se realizaron las pruebas con dos niveles de carga (baja y alta). Se adquirieron datos durante 10 segundos según recomendación de la norma SAW J1349 (ANNEXO 2) [33]. Después, se acopló el motor Changfa a otro motor para realizar pruebas de arrastre, que consistían en que el motor fuese impulsado por otro sin generar combustión en la cámara, se realizaron estas pruebas por 10 segundos con la válvula de mariposa completamente abierta y completamente cerrada (ANEXO 3).

Se cambió la relación de compresión de 9:1 a 11:1 añadiendo un disco para aumentar el volumen muerto de la cámara tal como se ve en la figura 34. Se vació el tanque de gasolina y se dejó trabajando el motor para que eliminara residuos de la gasolina corriente y así poder cambiar a gasolina extra. Al igual que con la anterior relación de compresión, se realizaron pruebas con dos niveles de carga (baja y alta) y se adquirieron datos por 10 segundos tratando de utilizar los mismos puntos de régimen de giro encontrados con anterioridad (ANEXOS 4 y 5). En la *Tabla 14* se muestran los combustibles utilizados en las pruebas y sus relaciones de compresión.

RC	Combustible
9:1	Gasolina corriente
11:1	Gasolina extra

Tabla 14. Combustibles utilizados con sus relaciones de compresión.

5.1.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

Inicialmente se pone en marcha el motor para verificar que todos los sensores instalados estén funcionando de manera correcta, a continuación, se realiza el procedimiento descrito en el numeral anterior para calcular los valores de apertura de mariposa y ángulo de avance requeridos para cada uno de los puntos de diseño. Una vez consignados estos datos, como se mostró en la *Tabla 12* y la *Tabla 13* se procede adquirir las señales necesarias.

La adquisición de las señales se realizó por medio de un código ejecutado en el software LabView. Para ello se pone en marcha el motor nuevamente, a continuación se organizan en los valores previamente calculados de apertura de mariposa y ángulo de avance y se aplica la carga al motor, cuando se estabilizan las revoluciones se verifica que la relación de aire combustible continúe en valores cercanos al estequiométrico, una vez se ha verificado todo se procede a adquirir las señales durante 10 segundos, este procedimiento se realiza de la misma manera para cada uno de los puntos de diseño del experimento, cada punto de diseño, como se mencionó anteriormente, con tres repeticiones que se realizan de manera aleatoria.

La verificación del régimen de giro se realiza mediante un software de visualización de los parámetros del motor. La presión se toma con el sensor de presión Kistler 7061B y su respectivo amplificador Kistler 5011 es el que permite la visualización de los valores registrados en el LabView. El flujo de combustible se obtuvo por medio de un medidor de flujo conectado al motor como se muestra en la *Figura 19*. La fuerza se obtuvo por medio de la celda de carga, la cual es registrada y mostrada en el computador.

5.1.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

La fuerza registrada es utilizada para el cálculo del par entregado por el motor aplicando la ecuación 9. Luego, con el par, la potencia es calculada utilizando la ecuación 2.

Con el flujo registrado por el medidor de flujo y aplicando la ecuación 3 se obtuvo el consumo específico de combustible. (ANEXOS 11 y 12)

Las señales de presión y velocidad fueron tomadas con el sensor de presión Kistler y el sensor de velocidad respectivamente y fueron procesadas por medio del software Matlab (ANEXO 6), donde se exportaron todos los datos de Excel y se convirtieron a una matriz para facilidad de manejo (ANEXO 7). Con los algoritmos generados en Matlab se graficaron todas las señales de presión y velocidad (*Figura 35*) y se normalizaron a presión ambiente (86 kPa) como parte del pre-procesamiento (*Figura 36*) (ANEXO 8).

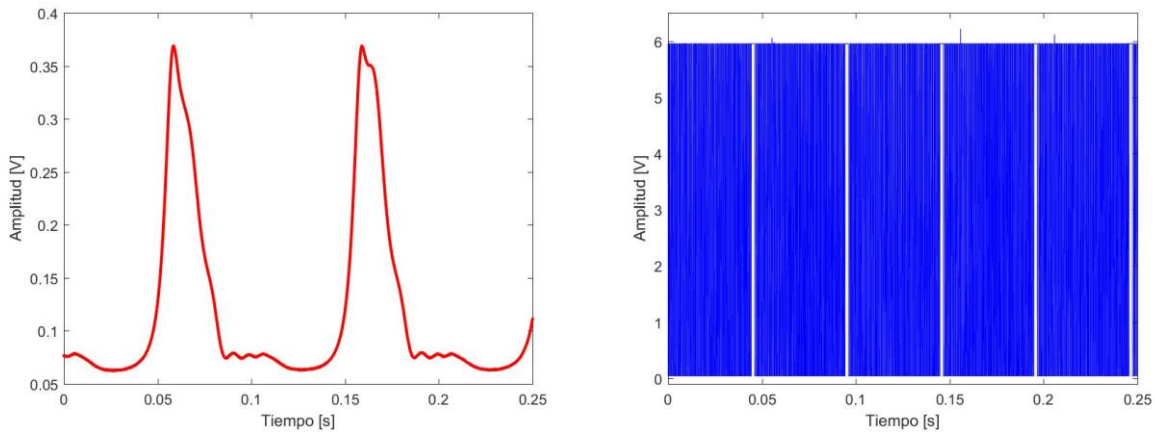


Figura 35. Señales de presión y velocidad

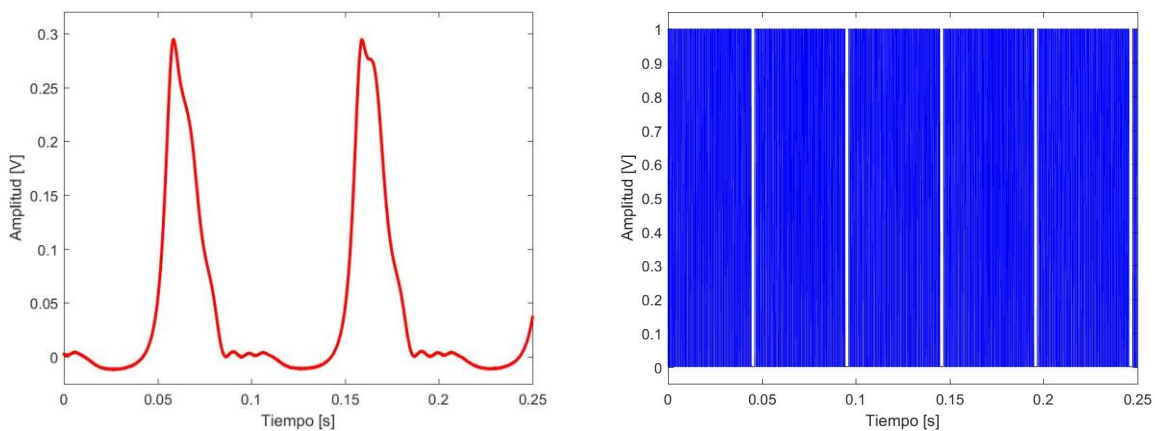


Figura 36. Señales de presión y velocidad normalizadas

Cabe resaltar que el filtrado de señales es una parte fundamental del pre-procesamiento, pero como se usó un sensor de presión avanzado, este ya tomaba las señales filtradas, por lo cual se

visualizaban limpias y sin ruido. Teniendo todas las señales de presión normalizadas, se segmentó cada prueba por ciclo de combustión (*Figura 37*) y se superpusieron todos los ciclos en una sola gráfica (ANEXOS 9 y 10). Después, se calculó la media y la desviación estándar para posteriores análisis.

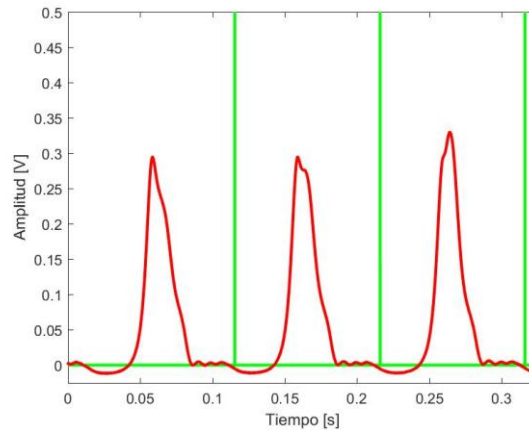


Figura 37. Señal segmentada

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las señales fueron tomadas, procesadas y graficadas, obteniendo curvas de operación tales como, presión, par, potencia y consumo para los combustibles utilizados (ANEXOS 13 y 14).

Gasolina corriente – relación de compresión 9:1. La *Figura 38* y la *Figura 39* muestran las curvas de operación del motor CHANGFA con una relación de compresión de 9:1 utilizando gasolina corriente a dos cargas diferentes.

Para el motor operando a carga baja, en la *Figura 38*, se observa un comportamiento decreciente en el par a partir de los 1800 RPM aproximadamente, siendo en este régimen de giro donde se presenta el máximo valor (11,87 N.m); y el par torsor mínimo presentado (8,85 N.m) en la curva se da con la máxima velocidad de giro que es de 3500 RPM. En cuanto a la potencia, se observa siempre un comportamiento creciente, siendo el valor máximo de 3,24 kW y el valor mínimo de 1,44 kW.

En el consumo específico de combustible se observa un comportamiento decreciente hasta aproximadamente los 3000 RPM y luego tiende a crecer. El valor mínimo de consumo es de 835,55 g/kW-h.

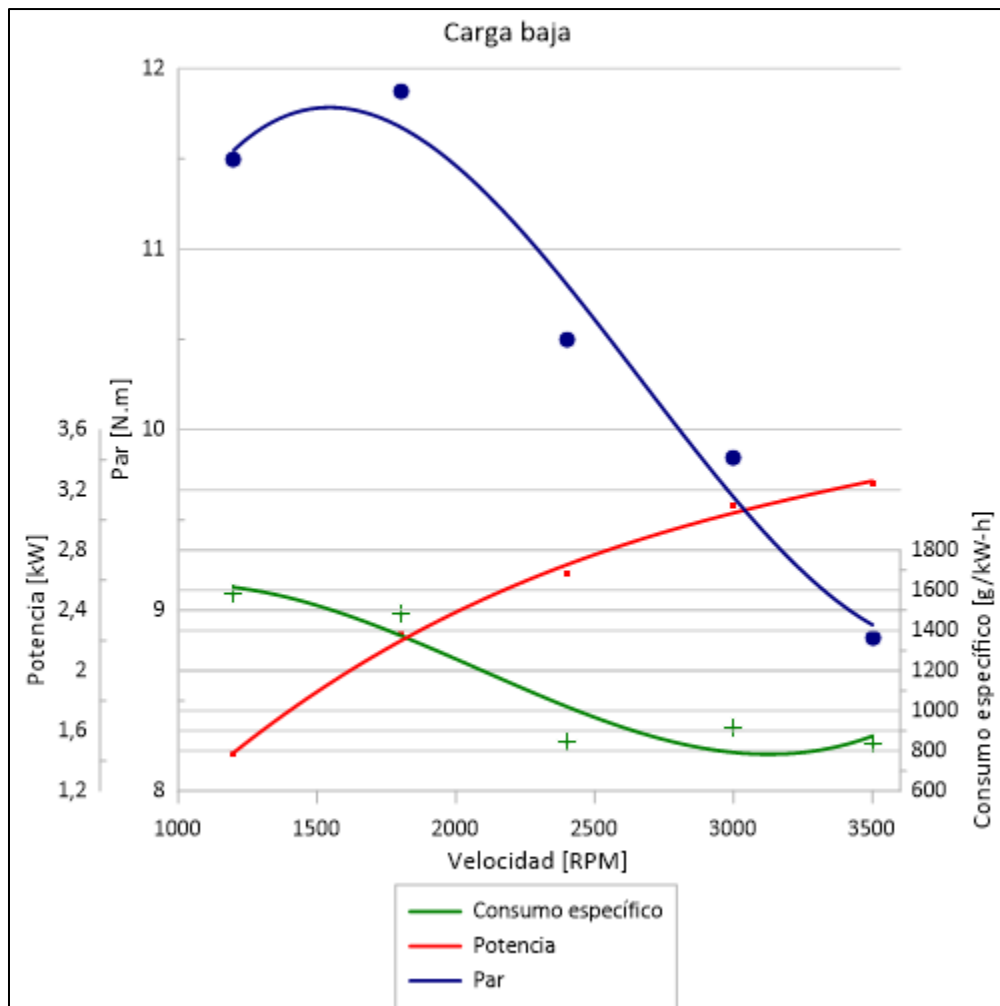


Figura 38. Curvas características a carga baja

Para el motor operando a carga alta, en la *Figura 39*, se observa igualmente un comportamiento decreciente en el par a partir de los 1500 RPM aproximadamente. El valor de par máximo presentado en la curva es de 13,82 N.m; y el valor del par torsor mínimo presentado es de 10,14 N.m que se da con la máxima velocidad de giro que es de 3500 RPM.

En cuanto a la potencia, se observa siempre un comportamiento creciente, siendo el valor máximo de 3,71 kW y el valor mínimo de 1,73 kW.

En el consumo específico de combustible se observa un comportamiento decreciente hasta aproximadamente los 3000 RPM y luego tiende a crecer. El valor mínimo de consumo es de 917,33 g/kW-h.

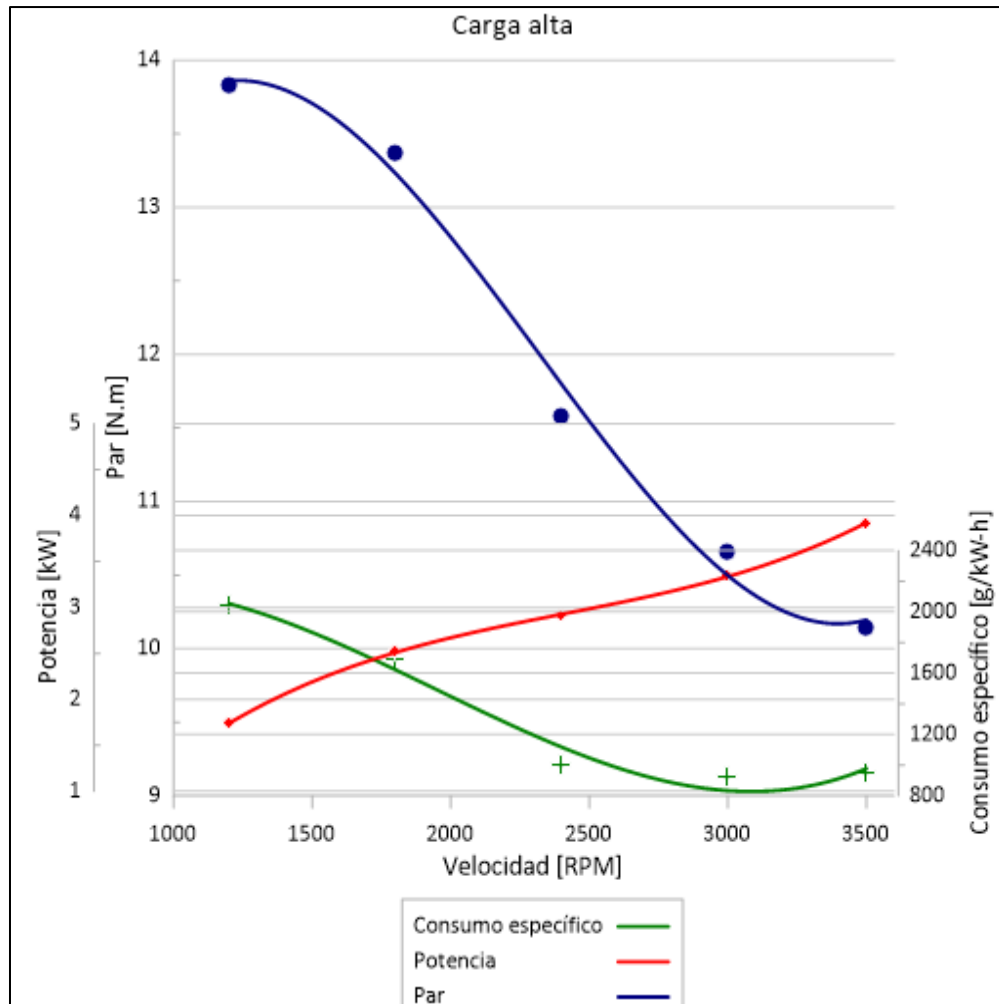


Figura 39. Curvas características a carga alta

De las dos figuras anteriores, se observa que a mayor carga son mayores los valores de par, potencia y consumo específico, debido a que la resistencia de giro que se le pone al motor es mayor.

Gasolina extra – relación de compresión 11:1. La *Figura 40* y la *Figura 41* muestran las curvas de operación del motor CHANGFA con una relación de compresión de 11:1 utilizando gasolina extra a dos cargas diferentes.

Para el motor operando a carga baja, en la *Figura 40*, se observa un comportamiento decreciente en el par a partir de los 1500 RPM aproximadamente, siendo el máximo valor 6,79 N.m; y el par torsor mínimo presentado (4,13 N.m) en la curva se da con la máxima velocidad de giro que es de 3500 RPM. En cuanto a la potencia, se observa siempre un comportamiento creciente hasta aproximadamente los 3000 RPM donde parece se vuelve constante, siendo el valor máximo de 1,56 kW y el valor mínimo de 0,83 kW.

En el consumo específico de combustible se observa un comportamiento decreciente hasta aproximadamente los 2400 RPM y luego tiende a crecer. El valor mínimo de consumo es de 1148,98 g/kW-h.

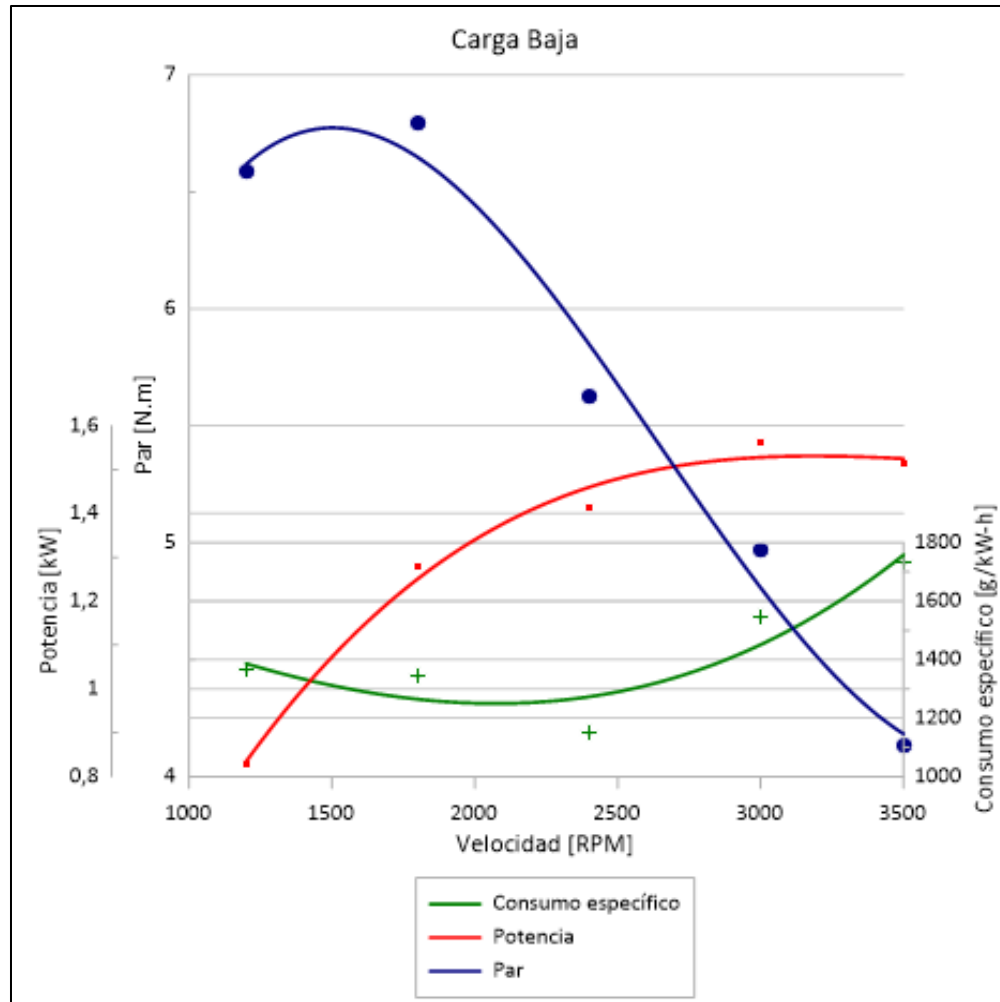


Figura 40. Curvas características a carga baja

Para el motor operando a carga alta, en la *Figura 41*, se observa igualmente un comportamiento decreciente en el par a partir de los 1300 RPM aproximadamente. El valor de par máximo presentado en la curva es de 9,11 N.m; y el valor del par torsor mínimo presentado es de 5,10 N.m que se da con la máxima velocidad de giro que es de 3500 RPM.

En cuanto a la potencia, se observa un comportamiento creciente hasta aproximadamente los 3000 RPM donde se vuelve constante, siendo el valor máximo de 1,87 kW y el valor mínimo de 1,14 kW.

En el consumo específico de combustible se observa un comportamiento decreciente hasta aproximadamente los 2400 RPM y luego tiende a crecer. El valor mínimo de consumo es de 863,92 g/kW-h.

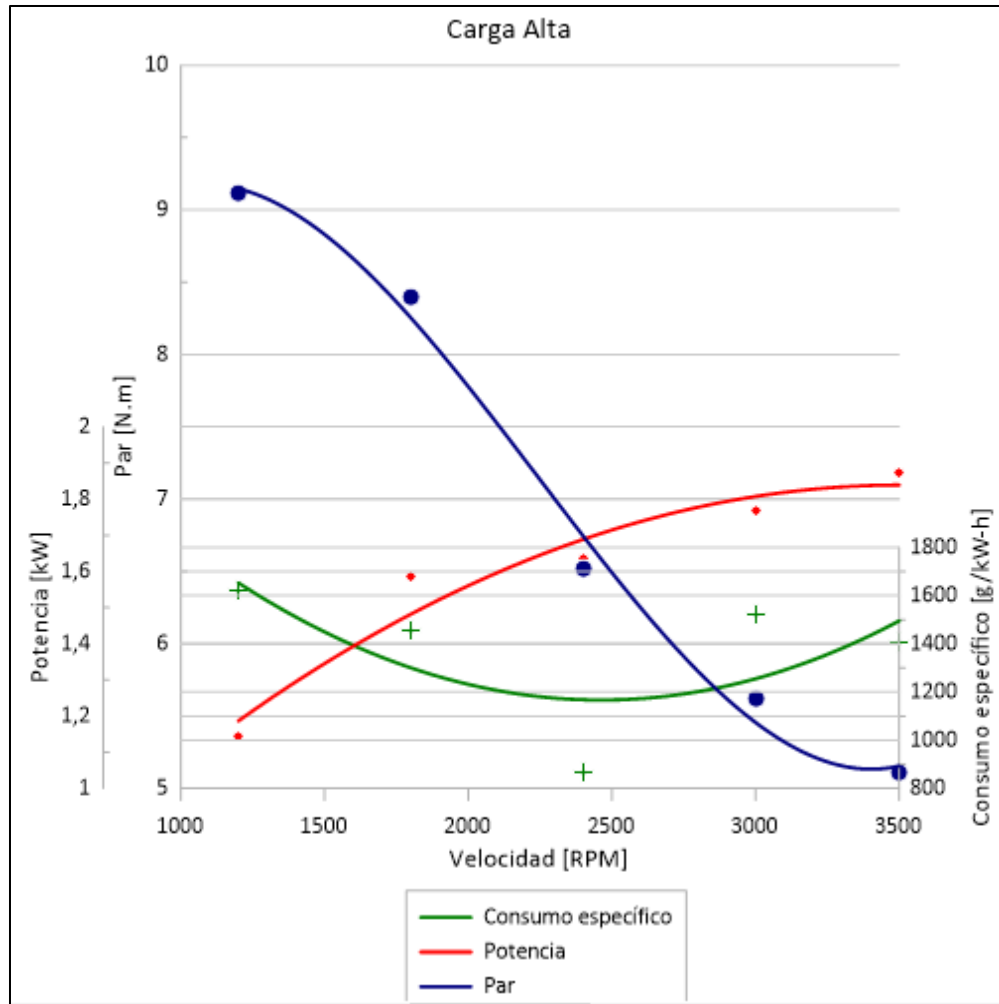


Figura 41. Curvas características a carga alta

Ahora, en la *Figura 42* y la *Figura 43* se muestra la comparación de par entre las dos relaciones de compresión a diferentes velocidades y las dos cargas.

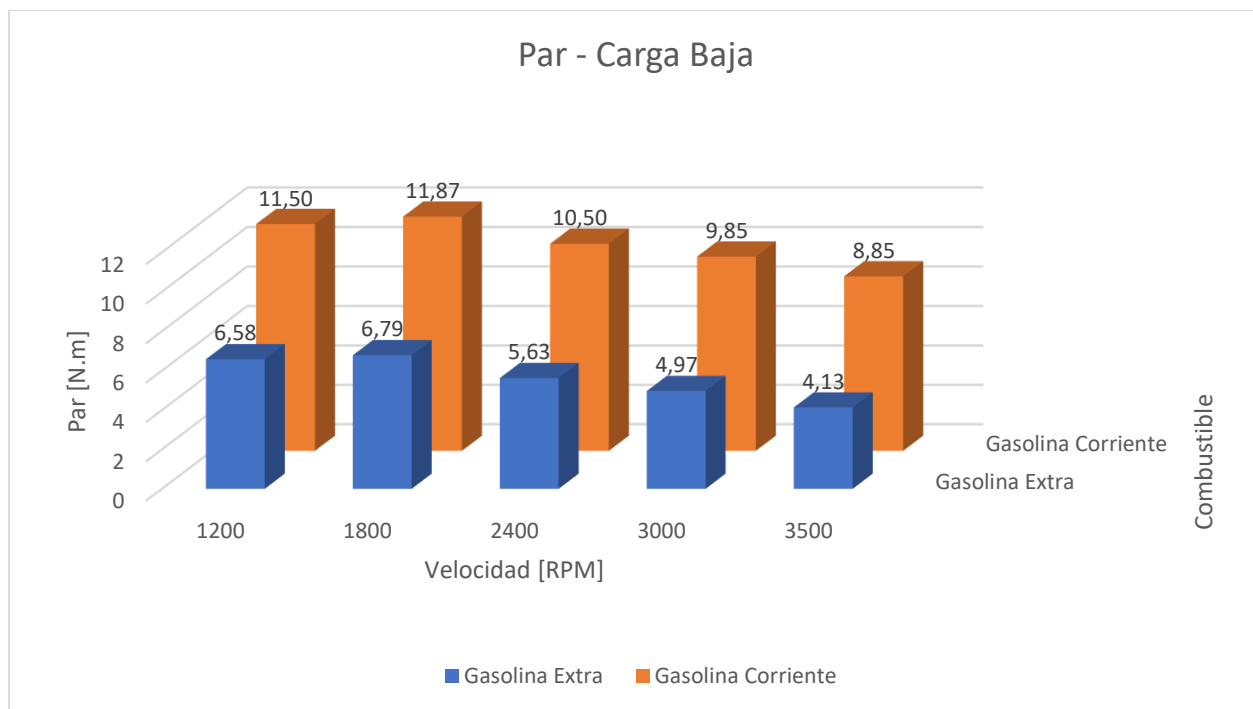


Figura 42. Comparación de par a carga baja

En la *Figura 42* se observa que el par en ambos casos disminuye a medida en que aumenta la velocidad, teniendo su mayor valor en ambos casos en 1800 RPM. Sin embargo, se nota que utilizando gasolina extra los valores de par son menores en comparación a los valores utilizando gasolina corriente. El valor máximo de par utilizando gasolina corriente es de 11,87 N.m y utilizando gasolina extra es de 6,79 N.m.

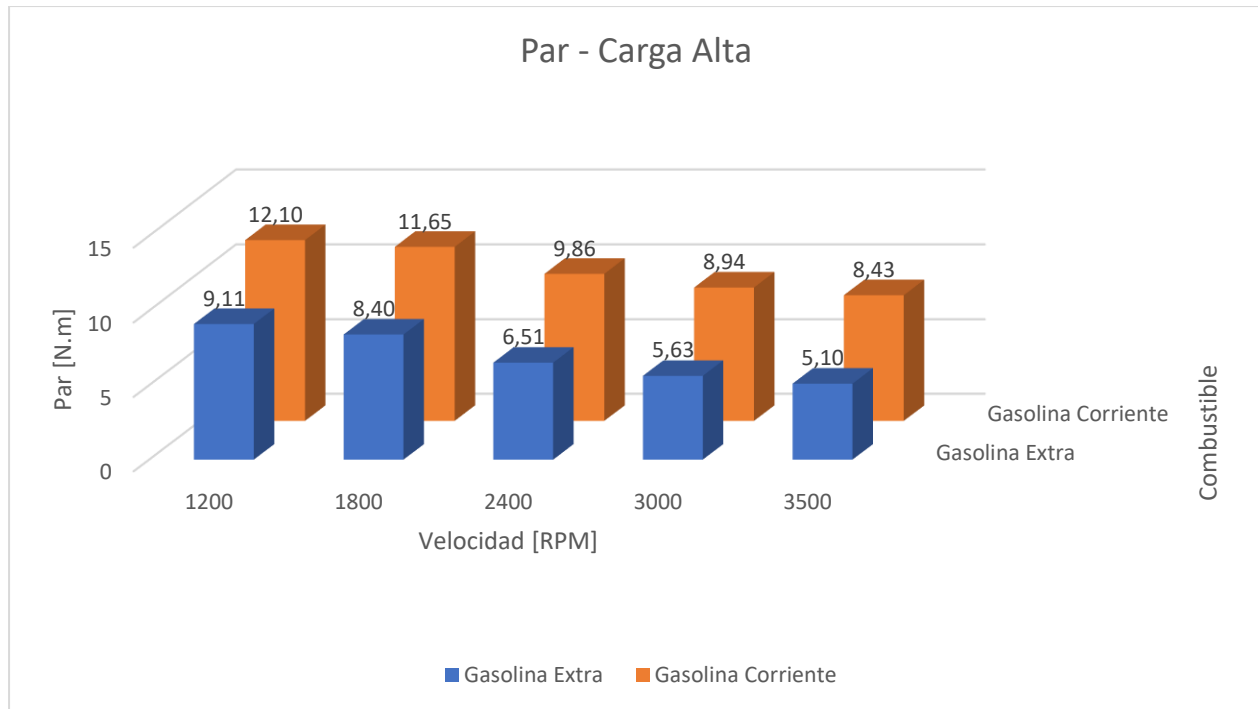


Figura 43. Comparación de par a carga alta

En la *Figura 43* se observa de igual forma que en la *Figura 42* que el par disminuye a medida en que aumenta la velocidad. Sin embargo, en este caso se observa que los valores de par son mayores en comparación a los valores de par a carga baja. El valor máximo de par utilizando gasolina corriente es de 12,10 N.m y utilizando gasolina extra es de 9,11 N.m.

En la *Figura 44* y la *Figura 45* se muestra la comparación de potencia entre las dos relaciones de compresión a diferentes velocidades y las dos cargas.

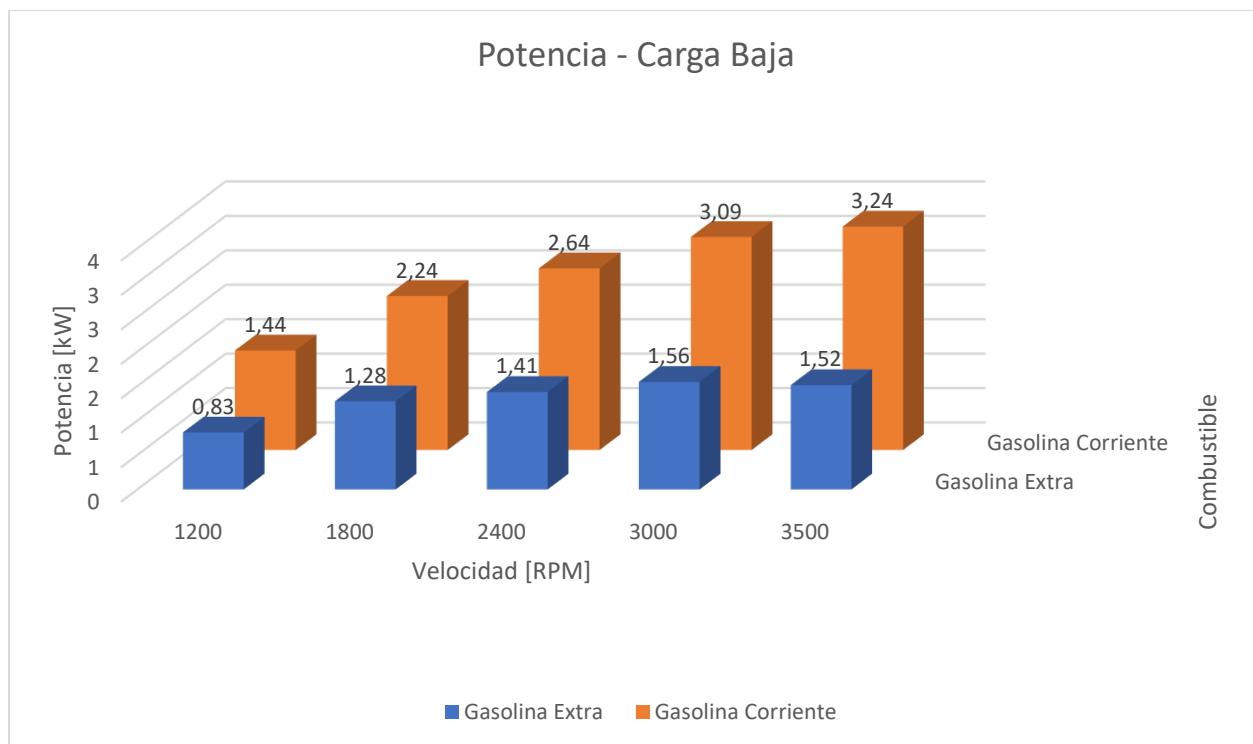


Figura 44. Comparación de potencia a carga baja

En la *Figura 44* se observa que la potencia en ambos casos aumenta a medida en que la velocidad aumenta, teniendo su mayor valor en ambos casos en 3500 RPM. Sin embargo, se nota que utilizando gasolina extra los valores de potencia son menores en comparación a los valores utilizando gasolina corriente. El valor máximo de potencia utilizando gasolina corriente es de 3,24 kW y utilizando gasolina extra es de 1,52 kW.

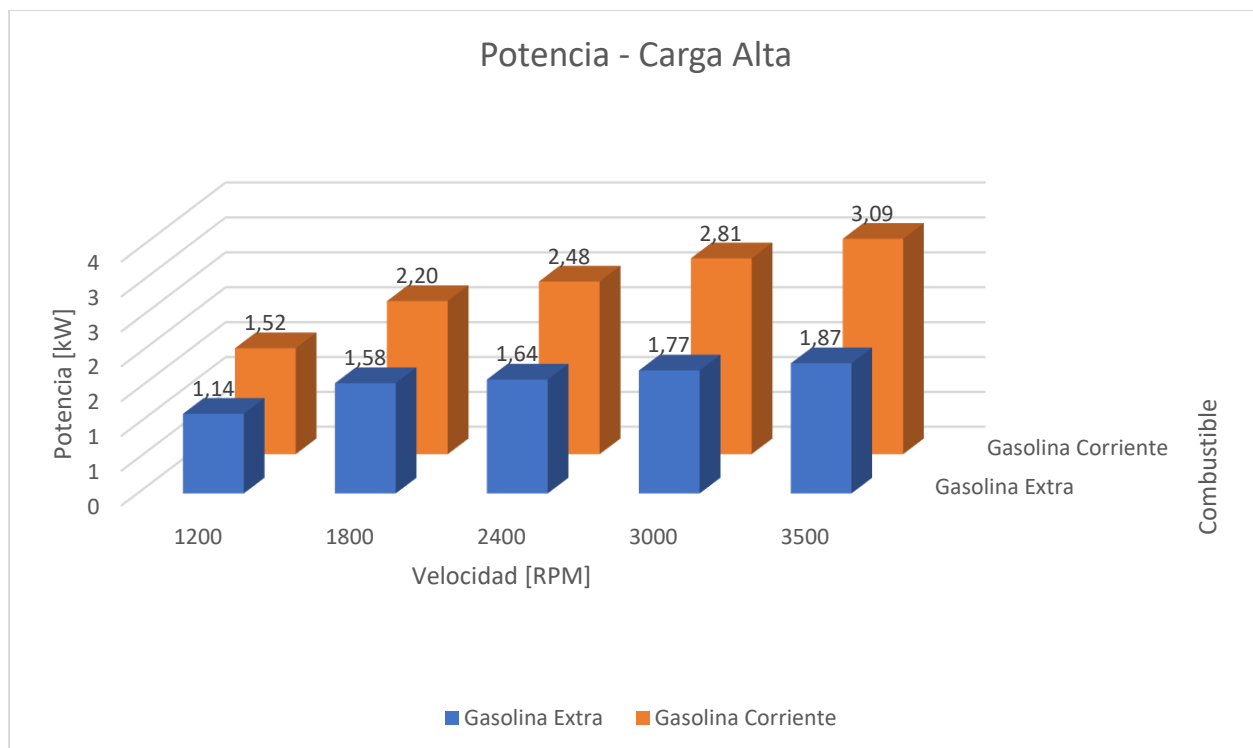


Figura 45. Comparación de potencia a carga alta

En la *Figura 45* se observa de igual forma que en la *Figura 44* que la potencia aumenta a medida en que aumenta la velocidad. Sin embargo, en este caso se observa que los valores de potencia son mayores en comparación a los valores de potencia a carga baja. El valor máximo de potencia utilizando gasolina corriente es de 3,09 kW y utilizando gasolina extra es de 1,87 kW.

En la *Figura 46* y la *Figura 47* se muestra la comparación de consumo específico de combustible entre las dos relaciones de compresión a diferentes velocidades y las dos cargas.

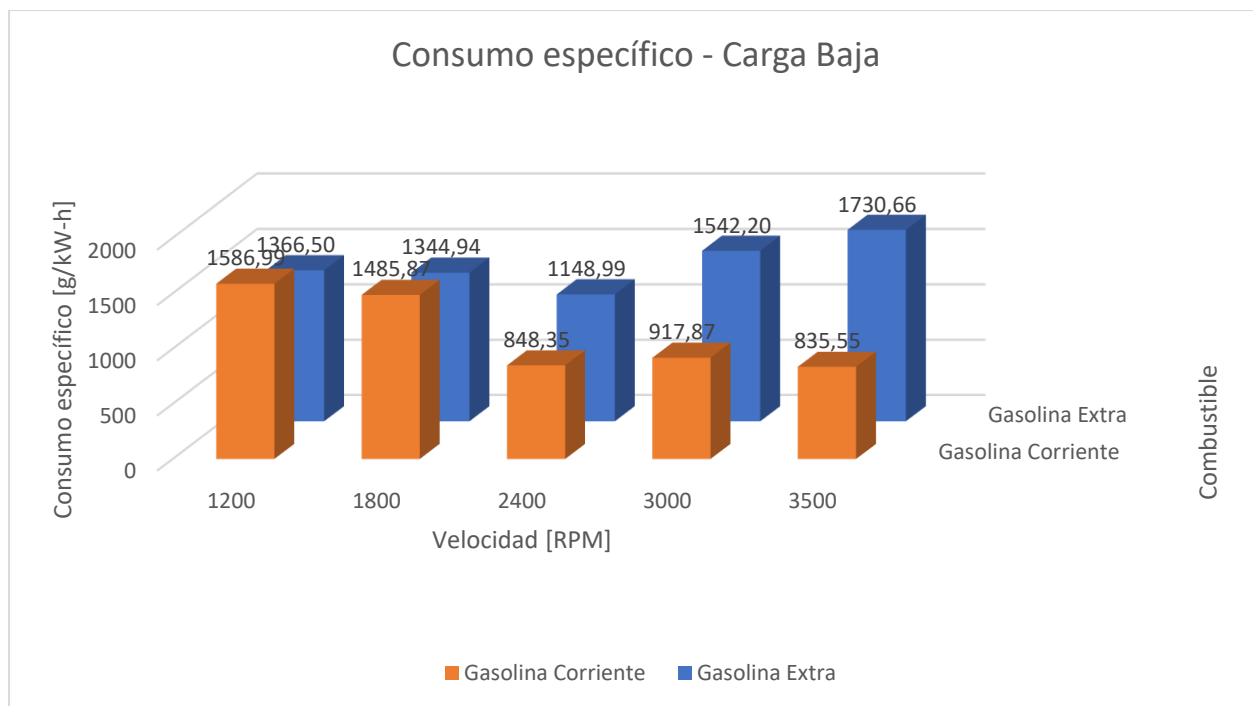


Figura 46. Comparación de consumo específico de combustible a carga baja

En la *Figura 46* se observa que el consumo específico de combustible decrece hasta aproximadamente 2400 RPM y de ahí comienza a crecer. Sin embargo, se nota que utilizando gasolina extra los valores de consumo son mayores en comparación a los valores utilizando gasolina corriente. El valor mínimo de consumo específico utilizando gasolina corriente es de 1148,99 g/kW-h y utilizando gasolina extra es de 848,35 g/kW-h.

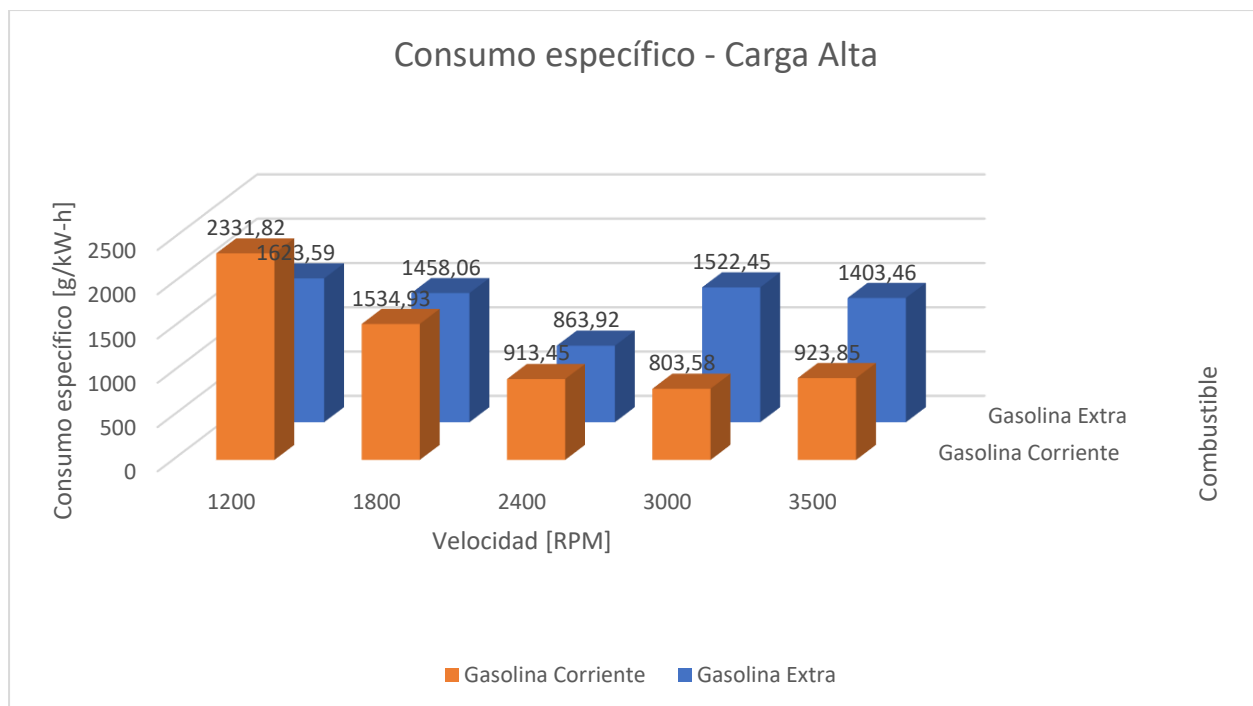


Figura 47. Comparación de consumo específico de combustible a carga alta

En la *Figura 47* se observa de igual forma que en la *Figura 46* que el consumo específico decrece hasta aproximadamente los 2400 RPM y de ahí comienza a crecer. Sin embargo, en este caso se observa que los valores de consumo son mayores en comparación a los valores de potencia a carga baja. El valor máximo de consumo específico utilizando gasolina corriente es de 803,58 g/kW-h y utilizando gasolina extra es de 863,92 g/kW-h. (ANEXO 15)

Para la presión se tienen tres diferentes figuras por cada prueba, teniendo la de superposición de ciclos, media y error.

En la *Figura 48* se tiene una superposición de ciclos a carga baja y a 1200 RPM, empezando el ciclo desde la admisión de combustible hasta el escape de los gases. La superposición de todos los ciclos obtenidos en una misma señal sirve para calcular o corroborar de manera gráfica que el punto donde inicia la combustión se encuentra o coincide con el punto en el que se encontraba ajustado el avance de chispa. Sirve también para observar que la mayor variación entre cada uno de los ciclos en el momento en el que salta la chispa y se produce la combustión, puede ser producida por múltiples factores, algunos de estos podrían ser las condiciones climáticas, la combustión incompleta, condiciones propias del diseño del motor y diferentes modificaciones realizadas al mismo, entre otros.

Nota: Las figuras para las otras condiciones de operación se encuentran en los anexos 9 y 10.

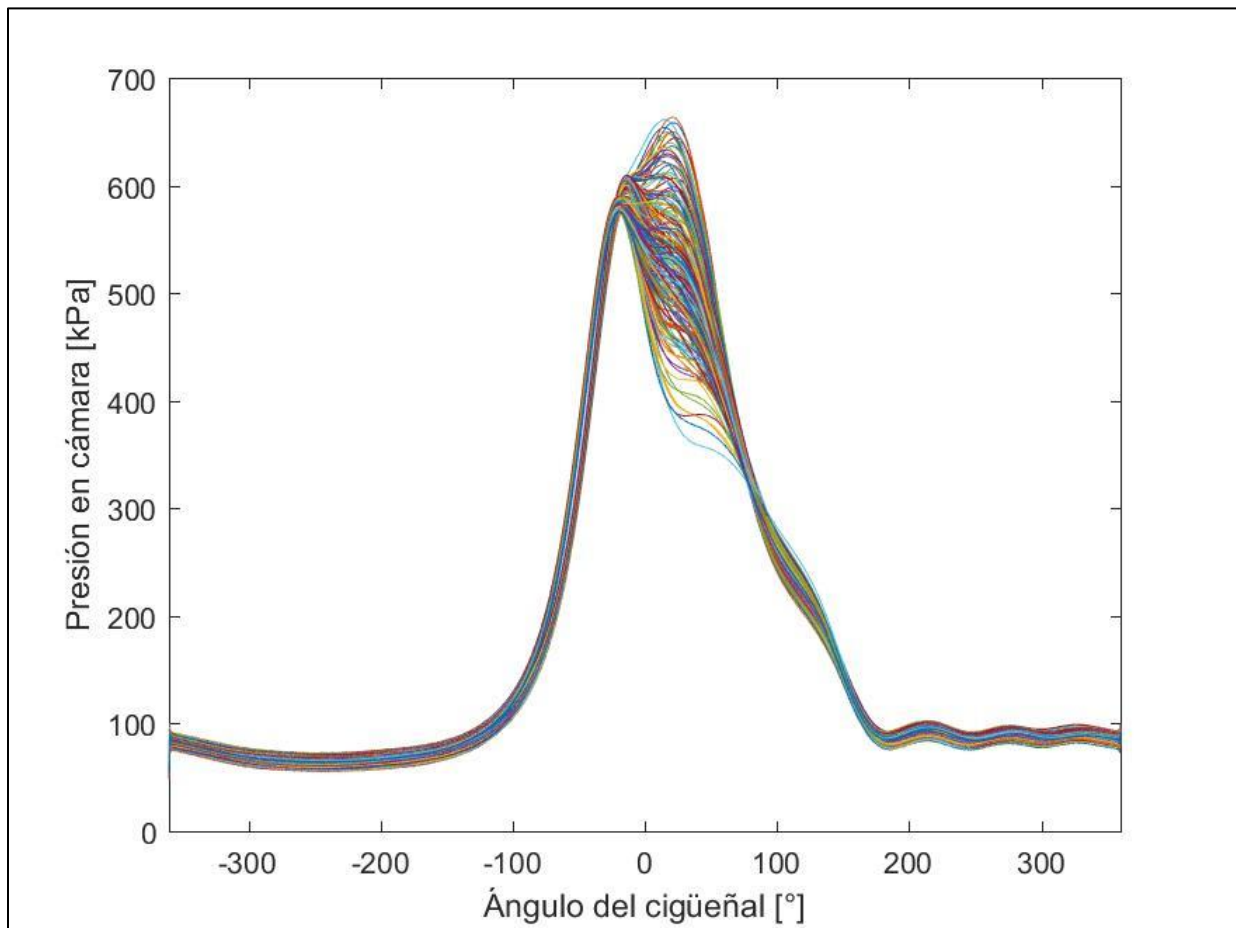


Figura 48. Superposición de ciclos.

En la *Figura 49* se tiene la media de todos los ciclos a carga baja y a 1200 RPM, se observa que el punto máximo de presión es aproximadamente 600 kPa. El cálculo de la media sirve para obtener una medida estándar de la variación presión en cada una de las fases del ciclo. La desviación sirve para mostrar qué tan alejados están los puntos de la media, en la figura se observa una desviación grande en la fase de expansión, que se puede deber a problemas anteriormente mencionados.

Nota: Las figuras para las otras condiciones de operación se encuentran en los ANEXOS 9 y 10.

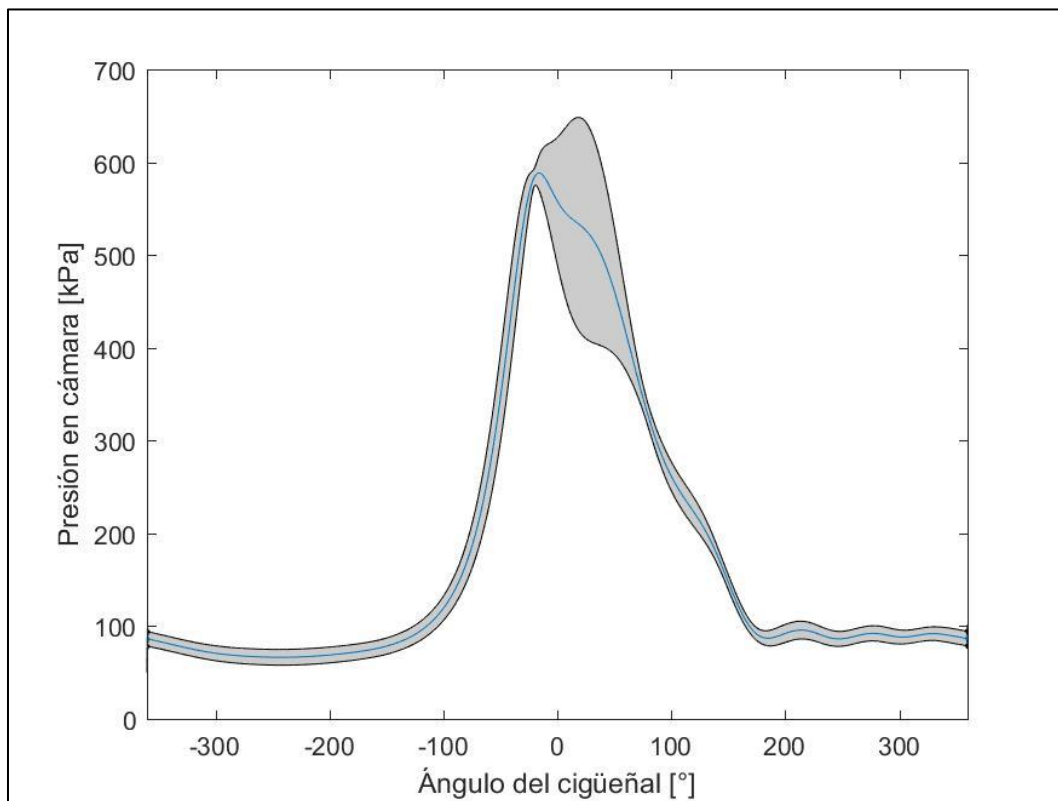


Figura 49. Media muestral de presión.

En la *Figura 50* se tiene el error de todos los ciclos a carga baja y a 1200 RPM. El conocimiento del error de muestreo sirve para observar que tan desfasados se encuentran algunos puntos, con respecto al comportamiento general o a las verdaderas características del comportamiento de la presión para cada una de las velocidades y las cargas. Debido a que este es la relación entre la media y la desviación estándar.

Nota: Las figuras para las otras condiciones de operación se encuentran en los anexos 9 y 10.

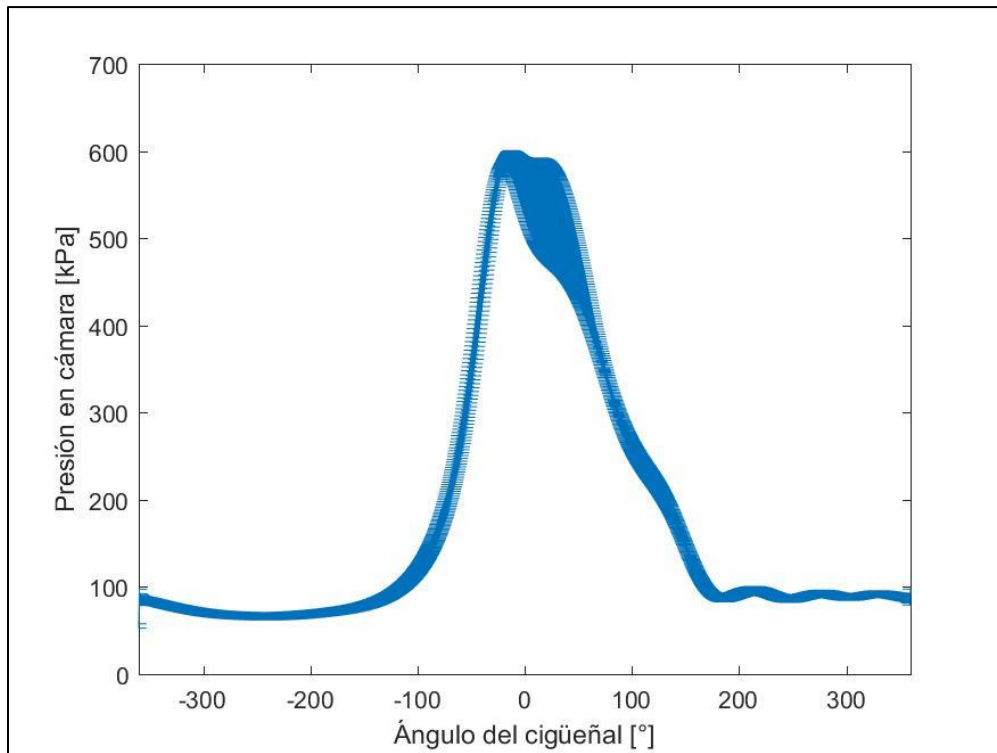


Figura 50. Error de presión.

CAPÍTULO 7: CONSIDERACIONES FINALES

7.1 CONCLUSIONES

- Se hizo una revisión bibliográfica de los conceptos teóricos sobre motores de combustión interna y sus parámetros de operación más relevantes, comprendiendo los principios generales de funcionamiento de los motores de combustión interna, así como su historia y su importancia en el mundo y la función que cumplen las curvas características de los mismos.
- Se estudiaron diferentes técnicas de pre-procesamiento y procesamiento de señales, revisando en la bibliografía los conceptos teóricos generales sobre el tratamiento de datos experimentales, con el fin de aplicar las técnicas necesarias para el análisis de los datos adquiridos. Para la etapa de pre-procesamiento se aplicaron técnicas de normalización y segmentación a las señales de velocidad y presión. Se concluye que realizar un correcto pre-procesamiento de los datos proporciona un mejor manejo y análisis de las señales experimentales en la etapa de procesamiento.
- Se desarrolló un modelo con base en datos para la generación de las curvas características de potencia, par y consumo del motor de combustión interna evaluado. Se obtuvieron dichas curvas para el motor funcionando con gasolina extra (relación de compresión de 11) y gasolina corriente (relación de compresión de 9), a velocidades de 1200, 1800, 2400, 3000 y 3500 con carga alta y baja. A partir de curvas representativas obtenidas, se pudo relacionar el comportamiento del par, consumo y potencia del motor para cada uno de los puntos de operación evaluados. Se concluye que el motor presenta una mayor potencia a mayor velocidad de rotación del cigüeñal y mayor carga.
- Se observa en los anexos que el consumo absoluto fue mayor en el motor usando una relación de 9:1 que una relación de 11:1, sin embargo, estos resultados no pueden ser comparados debido a que las condiciones en que se tomaron los datos fueron diferentes.
- Finalmente, se desarrolló un modelo con base en procesamiento de señales y técnicas estadísticas para determinar y analizar el comportamiento de la presión en la cámara, la cual se relacionó con el ángulo del cigüeñal. Por medio de las técnicas utilizadas, se pudieron obtener parámetros característicos del comportamiento de la presión, tal como: inicio de la combustión, presión más alta alcanzada y variación de presión durante un ciclo de combustión. Se concluye que se debe usar una técnica más precisa para caracterizar la

presión en la fase de expansión, ya que es allí donde se presenta una desviación mayor.

7.2 RECOMENDACIONES

Con el propósito de mejorar los modelos y la metodología planteada en el presente proyecto, se presentan a continuación algunas recomendaciones y sugerencias, para el desarrollo de futuros trabajos:

- El laboratorio de máquinas de combustión interna requiere una mejor organización y una mejora del sistema de evacuación de los gases producidos por los motores porque estos dificultan la permanencia de las personas en el laboratorio para la realización de proyectos.
- Se recomienda que los estudiantes adquieran más habilidades con respecto al manejo del *software* para la adquisición y procesamiento de señales experimentales.
- Se sugiere realizar una investigación en la que se desarrolle un modelo con base en datos que contenga una técnica más precisa para caracterizar la presión en la fase de expansión, ya que es allí donde se presenta mayor variación.
- Se recomienda que se desarrolle un modelo para la construcción del diagrama indicado ($P\sim v$) para el motor evaluado en este trabajo, a partir de la base de datos ya obtenida.
- Se recomienda volver a realizar la base de datos, estandarizando todos los puntos de operación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bosch, “Manual de la técnica del automovil.” 1999.
- [2] J. E. Gaviria Rios, J. H. Mora Juzman, and J. Ramiro Agudelo, “Historia de los motores de combustión,” *Revista Faculta de ingeniería*, vol. 26. pp. 66–78, 2002.
- [3] S. Celoni, “Motores De Combustion Interna,” pp. 1–94, 2007.
- [4] M. A. García, “Los motores y combustibles de los automóviles de hoy y del futuro,” p. 34, 2009.
- [5] D. Clavero, “6 tecnologías que demuestran que el motor de combustión interna está más vivo que nunca.,” 2017.
- [6] A. Rovira de Antonio and M. Muñoz Domínguez, *Motores de combustión interna*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2015.
- [7] “Cómo funciona un motor de 2 tiempos.” [Online]. Available: <https://www.aboutespanol.com/como-funciona-un-motor-de-2-tiempos-2401084>.
- [8] “Mazda’s SKYACTIV Technology.” [Online]. Available: <http://www.brakeandfrontend.com/mazda-s-skyactiv-technology/>.
- [9] F. Payri, J. M. Desantes, and et al., “Motores de combustión interna alternativos,” 2011.
- [10] F. S. Sim, A. M. Jes, L. Andes, and T. F. Cordero, “Análisis de los ciclos teóricos en motores de encendido por chispa,” vol. 22, no. 2, 2000.
- [11] “5 datos que has de conocer de SKYACTIV-X - Diariomotor.” [Online]. Available: <https://www.diariomotor.com/noticia/5-datos-mazda-skyactiv-x/>.
- [12] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, vol. 21. 1988.
- [13] “Motores alternativos,” *Univ. la Plata*, 2014.
- [14] “CICLO REAL DE FUNCIONAMIENTO.” [Online]. Available: https://previa.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/motores/temas/ciclo_real.pdf.
- [15] “Curva de Par y de Potencia.” [Online]. Available: <http://mepuedeservir.es/wp2/wp-content/uploads/2012/03/2.-CURVAS-CARACTERISTICAS-DE-MOTORES-Y-VEHICULOS-Recomprimidos..pdf>.
- [16] “Potencia y Par Motor. Cadena Cinemática. Estabilidad en los Vehículos.” [Online]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn63.html>.
- [17] A. ALVARADO C., *Maquinaria Y Mecanización Agrícola*. Costa Rica: Universidad estatal a distancia.
- [18] E. Pilataxi and K. Palomo, “Diseño y construcción de un sistema de medición del consumo específico de combustible con la utilización de un software para la optimización del dinamómetro del laboratorio de motores diesel gasolina.”
- [19] “El consumo específico de combustible.” .

- [20] M. Yolanda and R. Morales, “Manual de conducción técnica de vehículos automotores diesel.,” no. 360, 2012.
- [21] “Avance del Encendido.” [Online]. Available: <https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/89-avance-del-encendido/>.
- [22] J. Gorgas, N. Cardiel, and J. Zamorano, *Estadística básica para estudiantes de ciencias.* .
- [23] B. P. Ingenieros and L. R. Ojeda, *Probabilidad Y Estadística.* 2007.
- [24] “Coeficiente de curtosis (Términos estadísticos),” *glosarios@servidor-alicante.com*, Aug. 2015.
- [25] H. Gutiérrez-Pulido and R. De la Vara-Salazar, *Análisis y diseño de experimentos.* 2008.
- [26] “Changfa – Dinatex – Ecuador.” [Online]. Available: <http://dinatex.ec/producto/changfa/>.
- [27] J. David, R. Alzate, and A. A. Agudelo, “Validación experimental de la relación de compresión para varios combustibles a utilizar en un motor de combustión interna.,” 2017.
- [28] “Principle of Eddy-Current Electro Brake Dynamometer.” [Online]. Available: http://www.tokymeter.co.jp/english/product1/dyna/cat12_6e.htm.
- [29] “Eddy Current (Air Cooled) Dynamometers.” [Online]. Available: <https://www.dynomitedynamometer.com/eddy-current-dynamometer/eddy-current-dynamometer.htm>.
- [30] L. F. O. Gil, *Diseño de accionamientos y transmisiones de máquinas.* Universidad Tecnológica de Pereira, 1993.
- [31] “Sensores de velocidad.” [Online]. Available: <http://www.integracionycontrol.com/web/index.php/productos-integracion-y-control/sensorline/sensores-de-velocidad>.
- [32] “Sensor de presión y temperatura, medición directa ø4 mm | Kistler.” [Online]. Available: <https://www.kistler.com/es/producto/type-6190c/>.
- [33] Á. Ruíz-Aparicio, *Medidores de Velocidad (Hélice, Turbina y Molinete).* 2001.
- [34] SAE International, “Vehicle Standard,” vol. 4970, pp. 1–9, 2015.